



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ TVÁŘENÝCH SOUČÁSTÍ

HEAT TREATMENT OF FORMED PARTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Radim Leška

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Zdeněk Lidmila, CSc.

BRNO 2021

Zadaní bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Radim Leška**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **doc. Ing. Zdeněk Lidmila, CSc.**
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Tepelné zpracování tvářených součástí

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Tepelným zpracováním se upravují nejen polotovary připravované k tváření, ale i hotových výlisky a výkovky. Cílem tepelného zpracování polotovarů je zajistit jejich vhodné mechanické vlastnosti a tedy i potřebnou tvářitelnost. Účelem tepelného zpracování prováděného po tváření je pak zajištění požadovaných užitečných vlastností výlisků a výkovků. Na oblast tepelného zpracování ocelových polotovarů je zaměřena tato bakalářská práce.

Cíle bakalářské práce:

- Analyzovat tvářitelnost kovových materiálů a faktory tvářitelnost ovlivňující.
- Zpracovat literární studii věnovanou metodám tepelnému zpracování polotovarů a tvářených součástí.
- Analyzovat vliv deformačního procesu na vlastnosti výlisků a výkovků.
- Popsat cíle a procesy tepelnému zpracování při úpravě výlisků a výkovků.
- Navrhnout, připravit a realizovat experiment pro ověření vlivu tepelného zpracování na vlastnosti tvářené oceli.
- Vyhodnotit provedený experiment.

Seznam doporučené literatury:

MACEK, Karel, Petr, ZUNA a Jiří, JANOVEC Tepelné zpracování kovových materiálů. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze. 2008. 133s. ISBN 978-80-01-04186-4.

PTÁČEK, L., aj. Nauka o materiálu II. 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2002. 384 s. ISBN 80-7204-248-3.

KRAUS Václav Tepelné zpracování a slinování. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni. 2002. ISBN 80-7082-582-0.

SILBERNAGEL, Arnošt, Vojtěch, HRUBÝ, Miroslav, GREGER a Jiří, NĚMEC. Struktura, vlastnosti, zkoušení a použití kovů. 1. vyd. Ostrava: Kovosil. 2011. 284 s. ISBN 978-80-903694-6-7.

MODRÁČEK, Oldřich, Ladislav NĚMEC a Miroslav HLUCHÝ Strojírenská technologie 1: Metalografie a tepelné zpracování 2. díl. Praha: Scientia. 2002. ISBN 80-7183-265-0.

LIDMILA, Zdeněk. Teorie a technologie tváření I. Brno: Univerzita obrany. 2008. 105 s. ISBN 978-8-7213-579-6.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Leška Radim: Tepelné zpracování tvářených součástí.

Bakalářská práce se v rámci literární studie věnuje tváření, mechanismu plastické deformace a ocelím ke tváření. Dále popisuje principy tepelného zpracování, konkrétně metody využívané při přípravě polotovarů, výlisků a výkovků, tedy žíhání, kalení a popouštění. V praktické části bylo provedeno několik experimentů na oceli C45. První z nich ověřoval vliv deformačního zpevnění po pěchování, další byly zaměřeny na rekrystalizační žíhání, žíhání na měkko, kalení a popouštění. Vliv deformace a tepelného zpracování byl posuzován z hlediska tvrdosti, ta byla měřena zkouškou tvrdosti podle Vickerse.

Klíčová slova: tváření, tepelné zpracování, ocel C45, žíhání, kalení, popouštění

ABSTRACT

Leška Radim: Heat treatment of formed parts.

In the research part, the bachelor thesis deals with forming, the mechanism of plastic deformation and steels used for forming. It also describes the principles of heat treatment, specifically the methods used in the preparation of semi-finished products, pressings, and forgings, i.e., annealing, hardening, and tempering. In the practical part, several experiments were performed on C45 steel. The first of them verified the effect of strain hardening after compaction, the others were focused on recrystallization, full annealing, hardening, and tempering. The effect of deformation and heat treatment was assessed in terms of hardness, which was measured by the Vickers hardness test.

Key words: forming, heat treatment, C45 steel, annealing, hardening, tempering

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

LEŠKA, Radim. *Tepelné zpracování tvářených součástí* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-18]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132188>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Zdeněk Lidmila.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením doc. Ing. Zdeňka Lidmily, CSc.

V Brně dne 18.5.2021

.....
Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu doc. Ing. Zdeňku Lidmilovi, CSc., za cenné připomínky a odborné vedení mé bakalářské práce. Také bych rád poděkoval panu Vojtěchu Řiháčkovi za ochotu a pomoc při provádění experimentů.

OBSAH

Zadání
Abstrakt
Bibliografická citace
Čestné prohlášení
Poděkování
Obsah

| | |
|--|----|
| ÚVOD..... | 9 |
| 1 TVÁŘENÍ..... | 10 |
| 1.1 Rozdělení tváření | 10 |
| 1.1.1 Tváření za studena..... | 10 |
| 1.1.2 Tváření za tepla | 10 |
| 1.1.3 Tváření za poloohřevu..... | 11 |
| 1.2 Plastická deformace | 11 |
| 1.2.1 Deformační zpevnění | 11 |
| 1.2.2 Stárnutí oceli | 14 |
| 1.3 Tvářitelnost | 12 |
| 1.4 Oceli ke tváření | 13 |
| 1.4.1 Nelegované oceli..... | 14 |
| 1.4.2 Legované oceli | 14 |
| 2 TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ | 15 |
| 2.1 Ohřev..... | 15 |
| 2.2 Výdrž..... | 17 |
| 2.3 Ochlazování | 17 |
| 3 ŽÍHÁNÍ | 18 |
| 3.1 Žíhání bez překrystalizace..... | 19 |
| 3.1.1 Žíhání na snížení vnitřního pnutí | 19 |
| 3.1.2 Rekrystalizační žíhání..... | 20 |
| 3.1.3 Žíhání na měkko | 20 |
| 3.1.4 Protivločkové žíhání | 21 |
| 3.1.5 Žíhání pro odstranění křehkosti po moření..... | 21 |
| 3.1.6 Žíhání rozpouštěcí..... | 21 |
| 3.2 Žíhání s překrystalizací | 22 |
| 3.2.1 Homogenizační žíhání | 21 |
| 3.2.2 Normalizační žíhání | 22 |
| 3.2.3 Izotermické žíhání..... | 22 |
| 3.2.4 Kombinované žíhání | 22 |
| 4 KALENÍ A POPOUŠTĚNÍ | 23 |
| 4.1 Základní pojmy | 23 |
| 4.1.1 Kalitelnost..... | 23 |
| 4.1.2 Zakalitelnost..... | 23 |
| 4.1.3 Prokalitelnost | 23 |
| 4.1.4 Kalicí teplota..... | 24 |
| 4.1.5 Kalicí prostředí | 25 |
| 4.2 Martenzitické kalení..... | 27 |
| 4.2.1 Nepřetržité kalení..... | 27 |
| 4.2.2 Lomené kalení..... | 27 |
| 4.2.3 Termální kalení | 28 |

| | |
|---|----|
| 4.2.4 Kalení se zmrazováním..... | 30 |
| 4.3 Bainitické kalení..... | 30 |
| 4.3.1 Izotermické zušlechťování..... | 30 |
| 4.3.2 Izotermické kalení..... | 30 |
| 4.3.3 Nepřetržité bainitické kalení | 31 |
| 4.4 Popouštění | 31 |
| 4.4.1 Popouštění za nízkých teplot | 31 |
| 4.4.2 Popouštění za vysokých teplot..... | 32 |
| 5 EXPERIMENT..... | 32 |
| 5.1 Vzorky, materiál..... | 32 |
| 5.2 Měření tvrdosti | 32 |
| 5.3 Pěchování | 33 |
| 5.4 Rekrytalizace | 35 |
| 5.5 Žihání na měkko..... | 36 |
| 5.6 Kalení a popouštění..... | 37 |
| 6 ZÁVĚR..... | 39 |

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratk

Seznam obrázků

Seznam tabulek

ÚVOD [1], [2], [3]

Už nálezy z pravěku dokazují, že tepelné zpracování je jeden z nejstarších technologických procesů. Nejdříve se zpracovávaly hliněné výrobky vypálením v ohni, tedy slinováním. Další významný posun nastal s objevem kovů a jejich slitin, zpočátku mědi a bronzu, později hlavně železa. V primitivních jílových pecích se železo získávalo redukcí železných rud, produktem byla porézní „železná houba“, ze které se musela překováním odstraňovat struska. Zdokonalení přišlo s využitím vodní síly pro pohon vzduchových měchů, což umožnilo stavět vysoké pece, ze kterých už bylo získáváno surové železo, které bylo dobře slévateľné, ale křehké a nebylo jej možné kovat. V období průmyslové revoluce se začalo železo zkujňovat v konvertorech, což je technologie, která se používá dodnes. Vypouštění surového železa z vysoké pece je zachyceno na obr. 1.

Tepelné zpracování je řízený proces zahřívání a ochlazování, s využitím fázových a strukturních přeměn v tuhém stavu. Jeho cílem je zlepšit mechanické či technologické vlastnosti oceli. Během let bylo vyvinuto mnoho metod, a i dnes metalurgové pracují na zlepšení účinnosti a ekonomičnosti těchto procesů. Tepelné zpracování může mít několik výstupů. Existují procesy, které zlepší elasticitu oceli nebo naopak její pevnost, některé se provádí kvůli snížení vnitřního pnutí a další mohou měnit schopnost materiálu přenášet teplo. Často se stává, že součásti projdou více druhy tepelných úprav, například některé superslitiny používané v leteckém průmyslu projdou až šesti tepelnými procesy, aby měly optimální vlastnosti. Mezi nejdůležitější procesy patří žihání, kalení a popouštění. Obecně řečeno, cílem žihání je homogenizovat strukturu, kalení zvyšuje tvrdost, ale vytváří silně nerovnovážnou strukturu, což se řeší popouštěním, které nerovnováhu snižuje.



Obr. 1 Výroba železa ve vysoké peci [3]

1 TVÁŘENÍ [4], [5], [6]

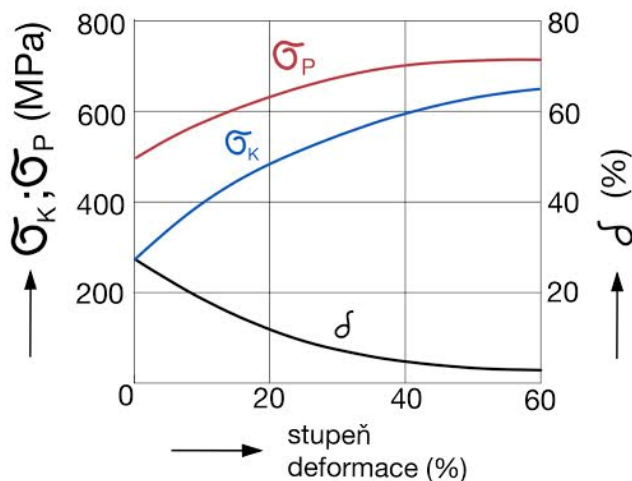
Tváření je jedním z nejdůležitějších výrobních procesů. Na rozdíl od obráběcích metod při tváření nevzniká tříska, změny tvaru polotovaru je dosaženo působením vnějších sil a následným vznikem plastických deformací. K těm dochází v okamžiku, kdy napětí dosáhne meze kluzu daného materiálu. Tváření provází změny struktury materiálu, což ovlivňuje mechanické vlastnosti výrobku. Mezi jeho výhody patří prakticky stoprocentní využití materiálu, vysoká produktivita a dobrá rozměrová přesnost. Mezi nevýhody patří vyšší pořizovací cena strojů a omezená velikost tvářené součásti.

1.1 Rozdělení tváření

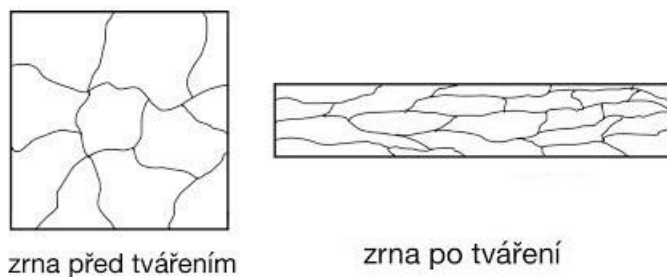
Jedno ze základních rozdělení tvářecích technologií je podle teploty, při které probíhají:

1.1.1 Tváření za studena [4], [5], [6]

Tento typ tváření probíhá při teplotách pod rekrystalizační teplotou, na teplotách okolo 30% teploty tání materiálu. Dochází při něm ke zpevnění materiálu, zvýšení meze kluzu a meze pevnosti a poklesu tažnosti, viz obr. 2. S rostoucím počtem tvářecích procesů se zrna deformují (obr. 3), čímž roste odpor proti dalšímu tváření. Nakonec dojde k úplnému vyčerpání plastičnosti materiálu. Schopnost deformace je možné obnovit zahřátím materiálu. Tváření za studena se používá v případech, kdy je žádoucí kvalitní povrch, vysoká přesnost rozměrů a zlepšování mechanických vlastností. Je ale třeba použití velkých tvářecích sil a počet tvářecích cyklů je omezen plastičností materiálu.



Obr. 3 Změna mech. vlastností tvářením [4]



Obr. 2 Změna struktury tvářením [4]

1.1.2 Tváření za tepla [4], [5], [6]

Tváření za tepla se provádí nad rekrystalizační teplotou, nad 70% teploty tání materiálu. Nedochází ke zpevňování materiálu, protože rekrystalizace proběhne tak rychle, že jakékoliv zpevňování způsobené tvářením zmizí už během tváření nebo bezprostředně po něm. Lze tedy používat mnohem menší tvářecí síly než u tváření za studena. Problémem u tváření za tepla bývá nekvalitní povrch, který je způsoben okujením a hrubnutím zrna. Při výrobě výkovků

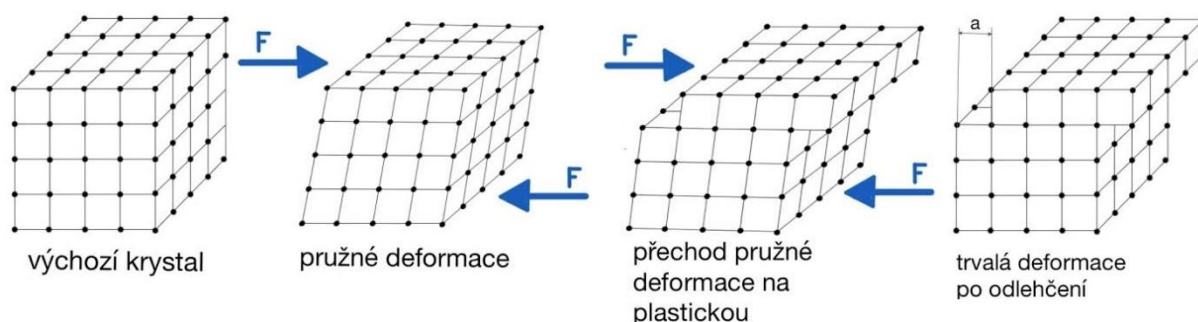
vzniká vláknitá struktura kopírující tvar výkovku, která ovlivňuje mechanické vlastnosti a anizotropii.

1.1.3 Tváření za poloohřevu [4], [5], [6]

Kompromis mezi tvářením za tepla a tvářením za studena je tváření za poloohřevu. Oproti tváření za studena nižší přetvárné odpory umožňují použít menší tvářecí síly a oproti tváření za tepla lze dosáhnout kvalitnějšího povrchu a větší přesnosti výrobku.

1.2 Plastická deformace [4], [5], [6]

Plastická deformace je základní mechanismus, který umožňuje tváření. Jedná se o stav vyvolaný působením vnějších sil na těleso, ve kterém dojde k nevratným změnám polohy atomů. Tím dojde k požadované trvalé změně tvaru součásti. Pokud by se atomy po ukončení působení vnější síly vrátili na své místo, jednalo by se o pružnou (elastickou) deformaci, viz obrázek 4. Plastická deformace je pro tváření zásadní, ale nelze zanedbávat ani vliv elastické deformace, která má také vliv na výsledný tvar a rozměry výrobku. Jako počáteční plastičnost je označován moment přechodu z pružného do plastického stavu a mezní plastičnost je stav při kterém dochází k porušení soudržnosti a vzniku prvních trhlin. Podle daných podmínek se plastická deformace při tváření obvykle realizuje jedním ze dvou mechanismů, vždy tím, který vyžaduje menší napětí. Jsou to mechanismy skluzu (amorfni, translační, složitý skluz) a dvojčatění. Zjednodušeně princip skluzu spočívá v posunu vrstvy atomů ve směru působení napětí, při dvojčatění se v první fázi natočí celá krystalová mřížka do vhodné polohy a poté proběhne deformace skluzem části takto natočeného krystalu.

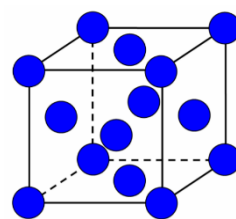


Obr. 4 Pružná a plastická deformace [4]

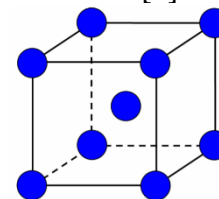
1.2.1 Deformační zpevnění [4], [5], [6]

Deformační zpevnění je důsledek plastické deformace, která probíhá pohybem dislokací ve směru kluzu. Na obrázku 7 je schéma deformačního zpevnění. Velký vliv na zpevňování má druh krystalové mřížky oceli. Austenit se při vysokých teplotách vyskytuje v kubické planimetrické mřížce (obr. 5) s označením KPC. Mřížka je ze 74 % zaplněna atomy, a tudíž dislokace mají méně prostoru na pohyb. Ferit se při nižších teplotách vyskytuje v kubické stereocentrické mřížce (KSC), viz obr. 6, kde je zaplněno 68% a tedy možnost pohybu dislokací je vyšší. Mřížka austenitu má 12 kluzových systémů, mřížka feritu 48, tím pádem je lépe tvárný.

Nejdříve se skluz realizuje v tzv. primárních kluzných systémech, kde nedochází ke kontaktu dislokací mezi sebou ani k nárazům do překážek (např. hranice zrn, vměstky). Velikost této oblasti zásadně ovlivňuje čistota materiálu a množství nerozpuštěných příměsí. Zpevnění je v této fázi minimální, síla potřebná k deformaci je konstantní. Jelikož dislokace

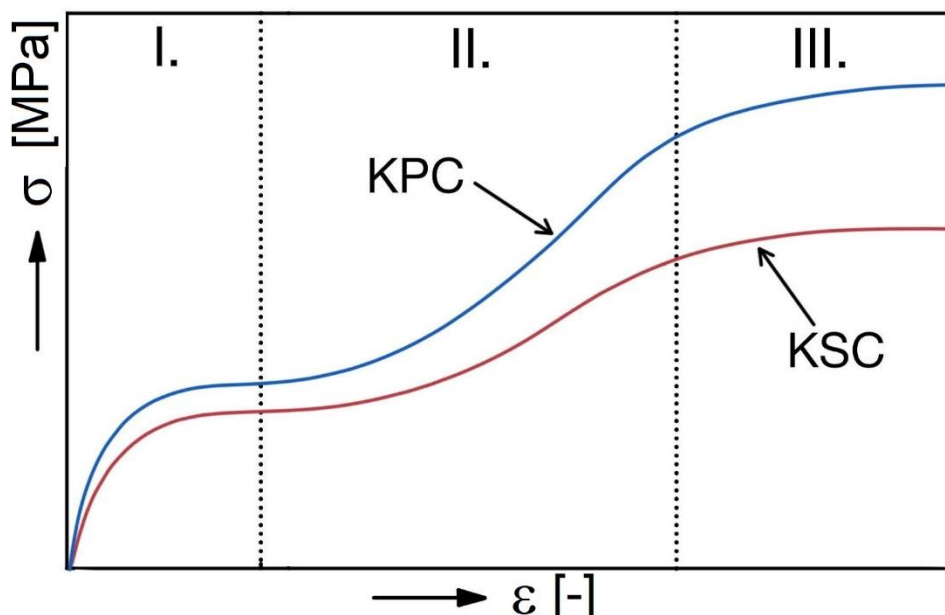


Obr. 5 KPC mřížka [6]



Obr. 6 KSC mřížka [6]

mohou při tváření vznikat a zanikat, mění se jejich množství a v případě nárůstu jejich počtu se snižuje prostor, ve kterém se mohou pohybovat. Ve druhé fázi tím dochází k mnohem častějším interakcím, jednotlivé dislokace do sebe častěji narážejí a vytvářejí dislokační síť. To vede k nárůstu deformačního odporu a k dalšímu pohybu je třeba zvýšit napětí. V poslední fázi dochází k menšímu zpevňování, jelikož vlivem velkého smykového napětí začnou šroubové dislokace příčným kluzem přeskakovat do jiných kluzných rovin a tím se vyhýbat překážkám.



Obr. 7 Křivky deformačního zpevňování [6]

1.2.2 Stárnutí oceli [7], [8]

Proces stárnutí ocelí zvyšuje jejich tvrdost tím, že vytváří precipitáty legujících prvků v krystalové mřížce. Ty pak stojí v cestě dislokacím a tím pádem ztěžují plastickou deformaci. Dalším důsledkem je zvýšení křehkosti. Stárnutí se ověřuje mechanickými zkouškami, např. zkouškou tahem, zkouškou tvrdosti či zkouškou rázem v ohybu.

Stejný proces jako je stárnutí ocelí je precipitační vytvrzování, rozdíl mezi nimi je prakticky jen formalita. Název precipitační vytvrzování se používá v případě, že jde o záměrné zvyšování pevnosti materiálu, stárnutí se používá v případě, že je to proces samovolný a nežádoucí.

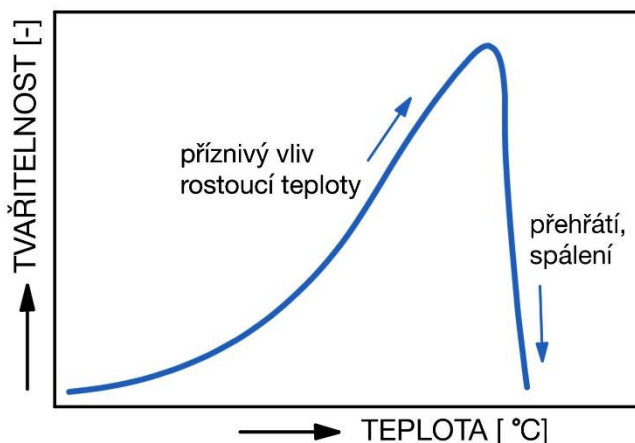
Precipitace je proces, kdy se po dodání vnější energie formou tepla nebo mechanické energie začne přesycený tuhý roztok rozpadat a vylučuje se přitom jedna fáze z druhé. Například při stárnutí oceli v železe precipitují částice karbidu železa. Reverzním procesem je homogenizace, při které se zvýšením teploty vyloučené prvky rozpouští zpět do základní fáze.

1.3 Tvařitelnost [4], [5], [6]

Popisuje schopnost materiálu plasticky se deformovat, dokud nedojde k porušení soudržnosti. Hlavní faktory ovlivňující tvařitelnost jsou:

- **chemické složení** – přítomnost legujících prvků a příměsí může mimo jiné ovlivnit podobu fázového diagramu a ovlivnit tak teploty při kterých probíhají fázové přeměny. Dále může mít vliv na rozpustnost, na tepelně aktivované děje jako je rekrytalizace nebo na veličiny, které ovlivňují parametry ohřevu (např. tepelná vodivost, roztažnost). Prvky se dělí na feritotvorné (Al, Si, V, Cr, Mo, W, Ti), austenitotvorné (C, Mn, Ni, Co, N) a karbidotvorné (Cr, W, Mo, V, Ti, Nb, B).

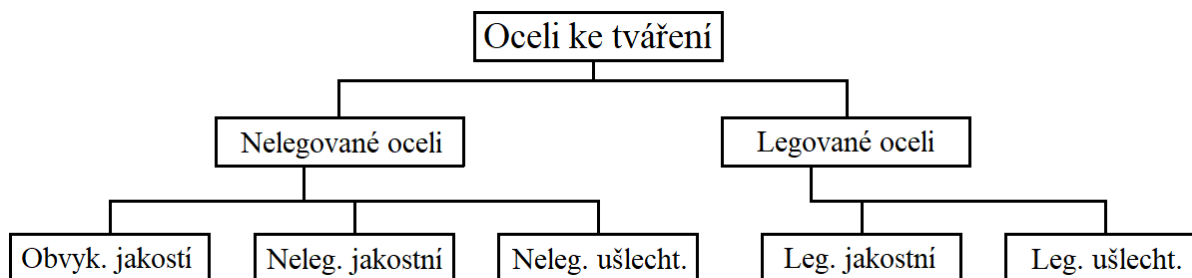
- **strukturní stav** – obecně lze tvrdit, že čím chemicky a strukturně jednodušší materiál, tím lepší je jeho tvařitelnost. Čisté kovy disponují nejlepší tvařitelností, což je způsobeno malým počtem překážek a čistotou hranic zrn a kluzných rovin, takže dislokace se mohou volněji pohybovat. Průběh tvařitelnosti u kovů typu KPC je obvykle monotónní (v závislosti na teplotě), kovy s mřížkou KSC jsou při nižších teplotách náchylné ke křehkosti. Pokud je struktura dvoufázová (např. ferit a austenit), tvařitelnost je výrazně nižší. Je to způsobeno různými mechanickými vlastnostmi těchto dvou složek, horšími podmínkami pro rekrystalizaci a různou rozpustností dalších prvků. Dalším faktorem, který zhoršuje tvařitelnost jsou vměstky. Zpomalují kluzový mechanismus a rekrystalizaci a fungují jako koncentrátoři napětí pro vznik trhlin.
- **termomechanické podmínky deformace** – patří sem teplota tváření, rychlost a velikost deformace a míra deformačního zpevnění. S rostoucí teplotou se atomy a dislokace více pohybují, deformační odpor je nižší, difúze probíhá rychleji a tím pádem se materiál i lépe uzdravuje. Je důležité dodržovat tvářecí teploty pro daný materiál, protože může dojít i k přehřátí až spálení oceli. Přehřátí vede k prudkému poklesu tvařitelnosti (obr. 8) vlivem zhrubnutí zrna a zvýšení rizika lomu. U spálené oceli dojde k natavení hranic zrn a poklesu plasticity až na nulu. Takováto ocel je na další tváření nepoužitelná a musí být přetavena.



Obr. 8 Vliv teploty na tvařitelnost [6]

1.4 Oceli ke tváření [1]

Oceli ke tváření jsou definovány českou normou ČSN EN 10020. Toto označení nesou oceli, ve kterých je méně než 2% uhlíku a hmotnostní podíl železa je zde vyšší než jiných prvků. Hodnota 2% C je obecně brána jako hranice mezi ocelí a litinou, i přesto, že některé chromové oceli obsahují uhlíku více. Na obrázku 9 je rozdělení ocelí ke tváření, v tabulce 1 jsou uvedeny mezní obsahy legovacích prvků pro rozdělení ocelí na legované a nelegované.



Obr. 9 Schéma rozdělení ocelí ke tváření [1]

Tab. 1 Mezní obsahy legovacích prvků [1]

| Legovací prvek | Značka | Obsah [hmot. %] | Legovací prvek | Značka | Obsah [hmot. %] |
|----------------|--------|-----------------|----------------|--------|-----------------|
| Hliník | Al | 0,10 | Nikl | Ni | 0,30 |
| Bór | B | 0,0008 | Olovo | Pb | 0,40 |
| Vizmut | Bi | 0,10 | Selen | Se | 0,10 |
| Kobalt | Co | 0,10 | Křemík | Si | 0,50 |
| Chró | Cr | 0,30 | Telur | Te | 0,10 |
| Měď | Cu | 0,40 | Titan | Ti | 0,05 |
| Lanthanidy* | La | 0,05 | Vanad | V | 0,10 |
| Mangan | Mn | 1,65 | Wolfram | W | 0,10 |
| Molybden | Mo | 0,08 | Zirkon | Zr | 0,05 |
| Niob | Nb | 0,06 | Ostatní** | - | 0,05 |

*hodnoceno jednotlivě; **vyjma C, P, S, N

1.4.1 Nelegované oceli [1]

Do této kategorie spadají oceli, u kterých jednotlivé prvky nedosahují mezních obsahů uvedených v tabulce 1. Dále se dělí na:

- **Oceli obvyklých jakostí** – nezpracovávají se dále tepelným zpracováním, s výjimkou žhání k odstranění pnutí, žhání na měkko či normalizačního žhání. Nemají stanoveny žádné speciální charakteristiky, kromě křemíku a manganu nemají předepsány žádné obsahy legujících prvků.
- **Nelegované jakostní oceli** – na tento druh ocelí jsou kladeny vyšší nároky než na oceli obvyklých jakostí, ale to, jak budou reagovat na tepelné zpracování, nebo jejich stupeň čistoty není všeobecně předepsáno.
- **Nelegované ušlechtilé oceli** – typ ocelí, který se zpracovává zušlechťováním a povrchovým kalením. Má vyšší nároky na stupeň čistoty a musí mít poměrně přesné chemické složení, které zaručí předvídatelnou a rovnoměrnou reakci na tepelné zpracování. Do této kategorie patří např. oceli používané pro jaderné reaktory, předpínací výztuže do betonu nebo vysoce namáhané pružiny.

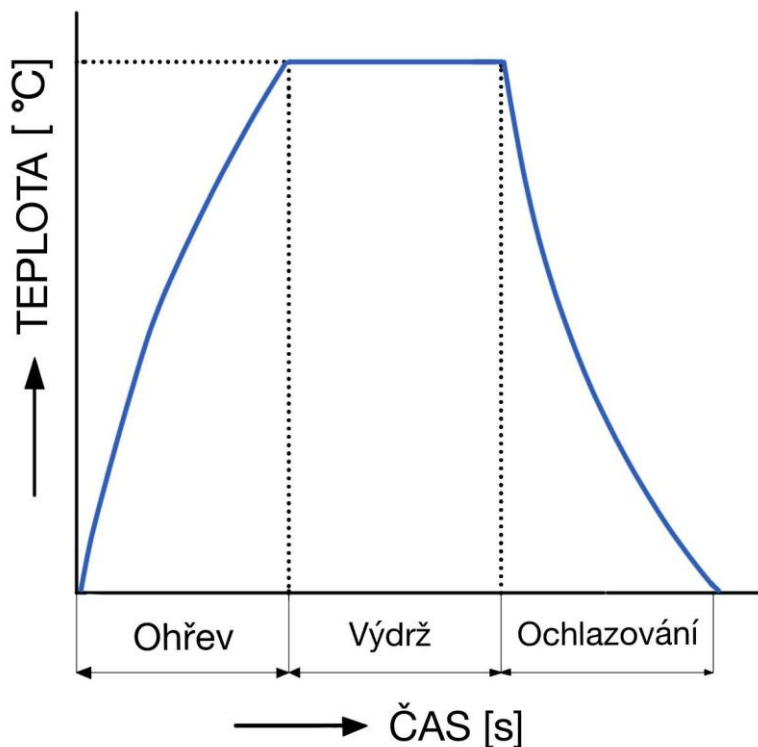
1.4.2 Legované oceli [1]

Jako legovanou lze označit ocel, ve které obsah minimálně jednoho z prvků uvedených v tabulce 1, dosahuje nebo překračuje mezní obsah. Dále se dělí na:

- **Legované jakostní oceli** – mají podobné spektrum využití jako nelegované jakostní oceli. Rozdíl je v tom, že kvůli určitému požadavku je v nich obsažen některý prvek v takovém množství, že jsou už označovány jako legované. V praxi se uplatní například při výrobě tlakových nádob, potrubí, kolejnic či důlních výztuží.
- **Legované ušlechtilé oceli** – patří sem oceli, které jsou svým přesným chemickým složením předurčeny pro určité použití. Jsou to nerezavějící oceli, žárovzdrnné a žárovečné oceli, nástrojové oceli, oceli na valivá ložiska apod.

2 TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ [1], [9], [10], [11]

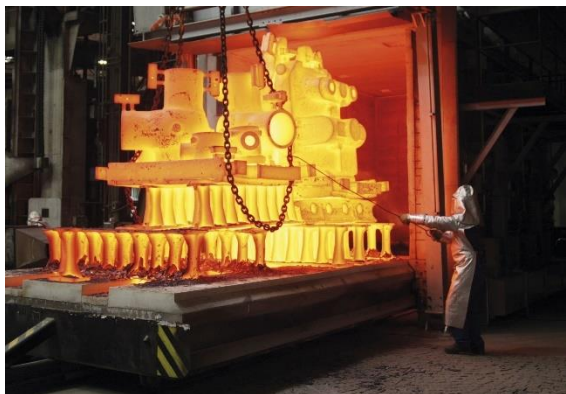
Tepelný cyklus, jemuž se součásti podrobují za účelem získání určitých vlastností se v závislosti na čase dělí na tři fáze, tj. ohřev, výdrž a ochlazování, viz obr. 10.



Obr. 10 Obecný diagram tepelného zpracování [9]

2.1 Ohřev [1], [9], [10], [11], [12], [13]

Ohřev součástí může probíhat buď v peci nebo v lázni. Na obrázcích 11 a 12 jsou zobrazeny dva druhy pecí – vozová a komorová. Pece mohou být elektrické, ve kterých je atmosféra tvořena vzduchem nebo plynové, ve kterých atmosféru tvoří zplodiny hoření. Kyslík v atmosféře může způsobovat nežádoucí efekty jako jsou oxidace (tvorba okujů) a oduhličování. Aby se tomuto zabránilo, v kusové výrobě se obvykle používají speciální nátěry či zábaly. V sériové výrobě je pak vhodnější použít efektivnější, ale dražší způsoby, ochrannou atmosféru (inertní směs CO, CH₄, CO₂ a H₂O, inertní plyny – dusík, argon) nebo ohřev ve vakuu. Lázně se používají pro menší předměty z legovaných ocelí. Tyto lázně mohou být roztavené kovy (Pb), slitiny (Pb-Sn) nebo roztavené soli (dusičnany a dusitany, chloridy).

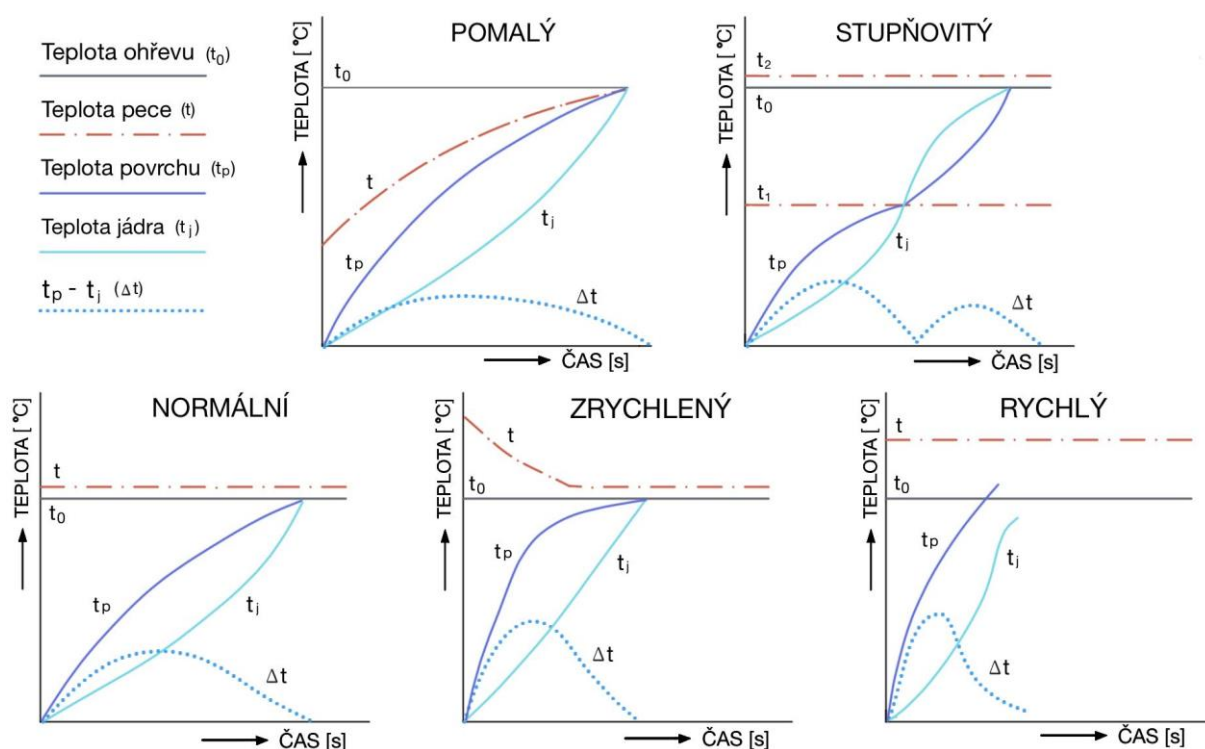


Obr. 12 Vozová pec [12]



Obr. 11 Komorová pec [13]

Nejdůležitější parametry ohřevu jsou konečná teplota, rychlost ohřevu, způsob, jakým je součást v peci uložena a teplotní a tepelný režim ohřevu. Teplota se odvíjí od způsobu tepelného zpracování. Čím vyšší teplota, tím menší deformační odpor, horní hranice je dána nebezpečím přehřátí, vyšším růstem zrna a intenzivnější oxidací. Rychlost ohřevu je důležitý parametr jak ze stránky technické, tak ekonomické. Z technického hlediska má značný vliv na velikost a rozmístění vnitřních pnutí, z hlediska ekonomického se vyplatí používat maximální možnou rychlost, která je samozřejmě omezena jak vlastnostmi, rozměry a tvarem zpracovávaného výrobku, tak výkonem pece. Co se týče uložení tělesa, je třeba se držet několika zásad. Součást se musí ohřívat pokud možno symetricky, poměr ohřívajícího povrchu ku hmotnosti tělesa by měl být co největší a součást musí být uložena tak, aby její pohyb nevyvolával zbytečná pnutí navíc. Na ohřev lze použít několik režimů, jejich schémata jsou na obrázku 13.



Obr. 13 Schématické znázornění vlivu způsobu ohřevu na vznik teplotních rozdílů [9]

- **Pomalý** – vsázka se vkládá do studené pece, až potom se začne ohřívat na předepsanou teplotu. Ohřev probíhá pomalu, takže se součást ohřívá rovnoměrně na povrchu i v jádře, tento způsob je však ekonomicky nevýhodný, výrobnost pece je nízká.
- **Normální** – pec se přehřeje na předepsanou teplotu nebo teplotu lehce vyšší, až poté se vloží vsázka. Tím je zvýšena výrobnost pece, ale je to na úkor vyšších teplotních pnutí kvůli větší teplotní nerovnováze. Tento způsob se často používá v komorových pecích a solných lázních.
- **Zrychlený** – intenzivní, ekonomicky výhodný režim, který využívá tepla z předchozí technologické operace. Vznikají zde vysoké pnutí vlivem velkých teplotních rozdílů mezi povrchem a jádrem vsázky.
- **Rychlý** – režim, který upřednostňuje výrobnost před dosažením nízkého vnitřního pnutí. Teplota v peci je podstatně vyšší než požadovaná teplota ohřevu, vsázka musí být vyjmuta po dosažení předepsané teploty. V praxi se tento režim používá u karuselových a průběžných pecí, kde lze zabránit přehřátí správným nastavením doby ohřevu.

- **Stupňovitý** – ohřev vsázky probíhá postupně ve více prostředích s rostoucí teplotou. Tento způsob ohřevu umožňuje dosahovat nízkých hodnot napětí, čímž se snižuje riziko deformace či prasknutí materiálu. Používá se např. pro ohřev rychlořezných ocelí na kalicí teplotu.

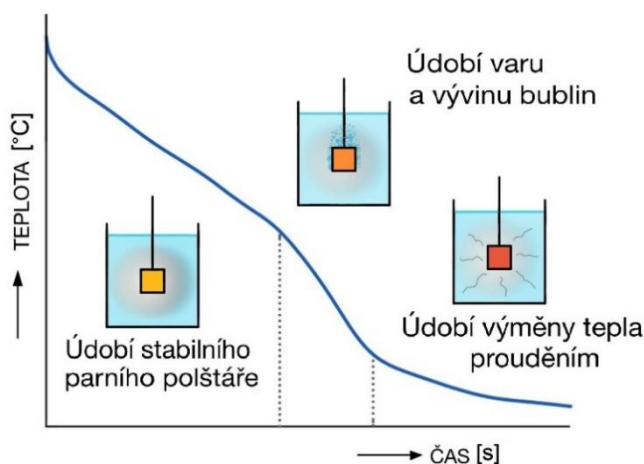
2.2 Výdrž [1], [9], [10], [11]

Výdrž neboli prodleva je fáze tepelného zpracování, při které se součást udržuje po určitý čas na dané teplotě. Procesy probíhající v této prodlevě jsou: vyrovnání teploty v celém průřezu součásti, difúzní pochody, snižování vnitřního pnutí a přechod rozpustných složek do tuhého roztoku nebo naopak jejich vyloučení.

2.3 Ochlazování [1], [9], [10], [11], [14]

Ochlazování se řídí stejnými zákony jako ohřev, děj však probíhá v opačném sledu. V reálných podmínkách je téměř nemožné docílit ochlazování konstantní rychlostí. Časovou závislost komplikuje i fakt, že teplota ochlazovaného materiálu je často vyšší, než je bod varu ochlazovacího prostředí. Prostředí tedy v průběhu ochlazování mění své skupenství, a průběh ochlazování lze rozdělit do tří údobí, viz obr. 14:

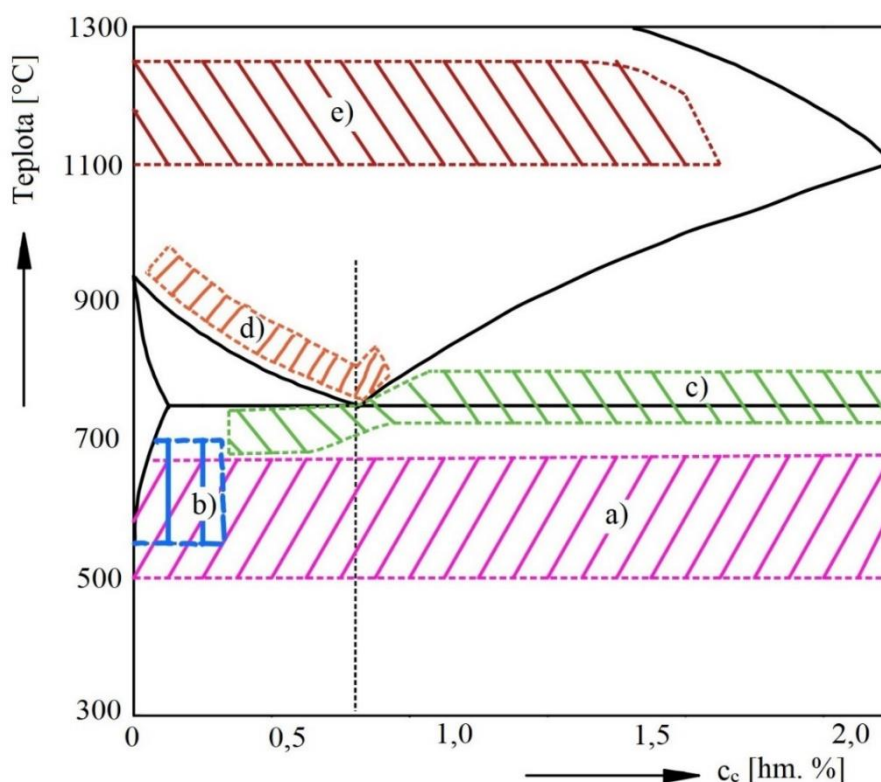
- **Údobí stabilního parního polštáře** – začíná ponořením součásti do ochlazovacího prostředí. V této fázi probíhá ochlazování velmi rychle a mezi prostředím a součástí se vytvoří vrstva páry – parní polštář. Díky okolní chladné kapalině pára kondenzuje, až do bodu, kdy se celý objem kapaliny ohřeje a vytvoří se stabilní parní polštář. Tím vznikne izolační vrstva mezi povrchem součásti a chladícím prostředím a zpomalí ochlazování, jelikož pára je špatný vodič tepla.
- **Údobí varu a vývinu bublin** – parní polštář se dosažením určité kritické teploty (pro každou kapalinu jiná hodnota, např. pro vodu je to 250 až 400 °C) stane nestabilním, jeho integrita je porušena a opět dochází k přímému kontaktu kapaliny s povrchem ochlazované součásti. Přenos tepla je zde mnohem větší než v první fázi a kapalina se začíná vařit. Jako unašeči tepla sloučí bublinky páry. V tomto údobí je rychlost ochlazování nejvyšší.
- **Údobí výměny tepla prouděním** – když teplota povrchu ochlazované součásti padne pod bod varu chladícího prostředí, přestane se tvořit pára a výměna tepla probíhá pouze prouděním, což podstatně snižuje rychlost ochlazování.



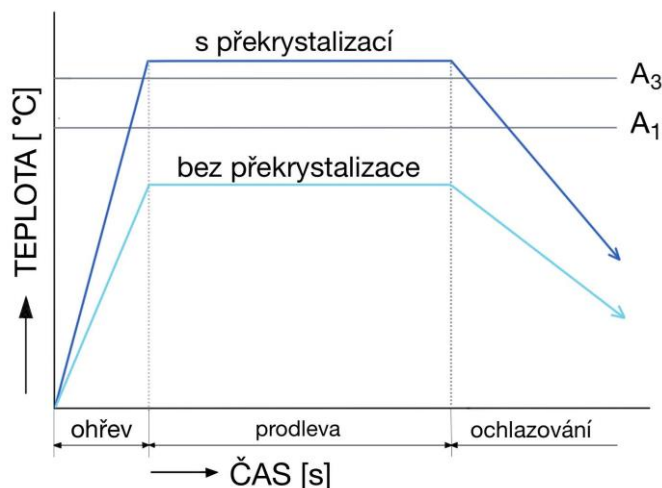
Obr. 14 Schéma průběhu ochlazování v prostředí se změnou skupenství [14]

3 ŽIHÁNÍ [1], [9], [10], [11], [15], [16]

Cílem žihání polotovarů a výrobků je odstranit nevhodnou strukturu a vlastnosti jako důsledek jejich technologického zpracování. Různými metodami žihání lze docílit homogenizace struktury, snížení tvrdosti, zlepšení tvárnosti, houževnatosti, obrobitelnosti nebo snížení vnitřních pnutí. Může být zařazeno na konec technologického postupu, ale může se jednat i o tzv. mezižihání, které má připravit polotovar pro další operace, například pro zlepšení obrobitelnosti nebo k obnově plasticity při tváření za studena. Na obr. 15 jsou uvedeny teploty základních způsobů žihání v diagramu Fe-Fe₃C. Podle probíhajících přeměn a použité teploty se žihání dá rozdělit na žihání bez překrystalizace a žihání s překrystalizací, viz obr 16.



Obr. 15 Oblasti žihacích teplot v diagramu Fe-Fe₃C: a) ke snížení pnutí, b) rekrytalizační, c) na měkko, d) normalizační, e) homogenizační [1]

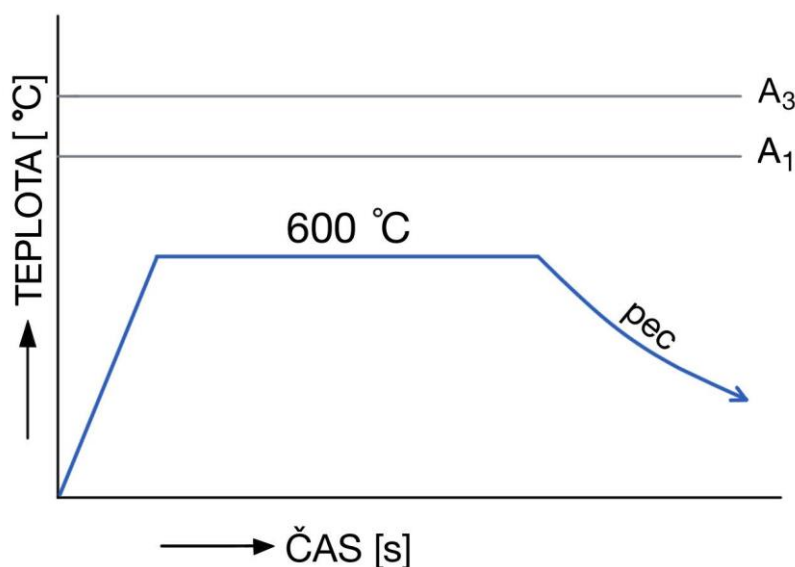


Obr. 16 Obecný diagram tep. zpracování s překrystalizací a bez překrystalizace [16]

3.1 Žihání bez překrystalizace

3.1.1 Žihání na snížení vnitřního pnutí [1], [9], [10], [11], [16], [17], [18]

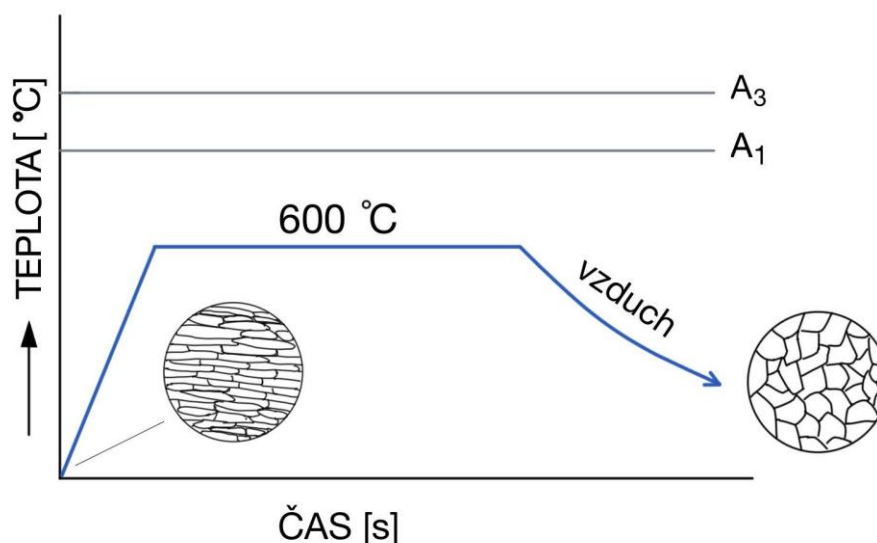
Cílem tohoto způsobu je odstranit nebo snížit zbytková vnitřní pnutí, která vznikají např. po svařování jako důsledek nerovnoměrného ohřevu, po tváření za studena nebo po rychlém nerovnoměrném ochlazování rozměrných nebo tvarově složitých součástí. Zároveň by nemělo dojít k žádným podstatným změnám mechanických vlastností výrobku. Ohřev se provádí na teplotu 500–650 °C, na které se podle velikosti součásti setrvává 1 až 10 hodin, dokud není teplota v celém průřezu stejná, poté se v peci pomalu ochlazuje na teplotu mezi 250 až 300 °C, dochlazení probíhá na vzduchu. Snížení vnitřních pnutí zajistí lokální plastická deformace, která je důsledkem snížení meze kluzu. Pro tento typ žihání jsou vhodné pece s nucenou cirkulací atmosféry, které zajistí rovnoměrný ohřev. Schéma průběhu žihání na snížení vnitřního pnutí je znázorněno na obr. 17.



Obr. 17 Žihání na snížení vnitřního pnutí [16]

3.1.2 Rekrystalizační žihání [1], [9], [10], [11], [16], [19]

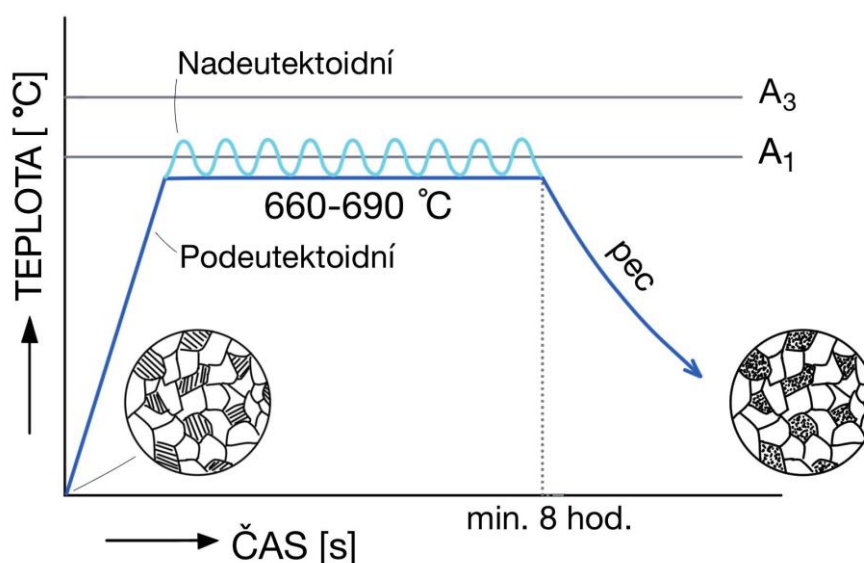
Používá se pro obnovu deformované struktury vzniklé po tváření za studena nebo jako mezioperační žihání při tváření za studena. Zajišťuje nukleaci a růst nových zrn, které postupně nahrazují deformovaná zrna, až je úplně odstraní. Tím dojde k obnovení plasticity, zvýší se tažnost a sníží tvrdost. Rekrystalizační teplota se podle druhu oceli pohybuje od 400 °C až do 700 °C, nesmí však překročit teplotu A_1 , což by spustilo proces překrystalizace. Také je třeba brát v potaz že nižší teplota zajistí jemnější zrna. Doba prodlevy na této teplotě a rychlost ohřevu se odvíjí od počtu tvářecích cyklů a chemického složení materiálu. Obvykle se doba výdrže na žhací teplotě pohybuje od 1 do 5 hodin. V praxi se rekrystalizační žihání zařazuje např. po kování, kvůli usnadnění dalšího zpracování obráběním. Na obrázku č. 18 je znázorněn časový průběh rekrystalizace, vzhled deformovaných zrn na začátku operace a obnovená struktura na konci procesu.



Obr. 18 Rekrytalizace a struktura před a po žíhání [16]

3.1.3 Žíhání na měkko [1], [9], [10], [11], [16], [20], [21]

Provádí se převážně u nástrojových ocelí a u některých konstrukčních legovaných ocelí. Cílem je snížení tvrdosti, zlepšení obrobitelnosti a dosažení struktury ve které budou převládat globulární karbidy. Používá se i jako příprava na kalení, homogenizuje strukturu. Teplota ohřevu a doba výdrže závisí na typu zpracovávané oceli. Pro podeutektoidní nízkolegované oceli platí, že se ohřívá na teplotu těsně pod A_1 (600 až 720 °C), výdrž na této teplotě se pohybuje zhruba od 4 do 8 hodin, ochlazuje se pomalu v peci. Dochází ke změně lamelárního perlitu na perlit zrnitý. Pro nadeutektoidní oceli a ledeburitické nástrojové oceli se teplota ohřevu pohybuje nad teplotou A_1 a ochlazování probíhá velice pomalou rychlostí (10 až 15 °C/h). Na obrázku č. 19 jsou znázorněny průběhy žíhání na měkko pro podeutektoidní a nadeutektoidní oceli a také struktura na začátku a na konci procesu.



Obr. 19 Žíhání na měkko [16]

3.1.4 Protivločkové žíhání [1], [9], [10], [11]

U polotovarů, převážně u těžkých výkovků a odlitků hrozí vznik vnitřních trhlin kruhového tvaru, takzvaných vloček. Je to způsobeno vyšším obsahem vodíku, jehož rozpustnost se s klesající teplotou snižuje, zejména při fázové přeměně z austenitu na ferit. Na rozhraní mezi maticí a minoritní fází se pak nerozpuštěný vodík vylučuje v molekulární formě a vlivem jeho hydrostatického tlaku mohou vznikat trhliny. Jako prevence tohoto procesu se používá právě protivločkové žíhání. Při ochlazování po tváření za tepla či odlití nesmí být teplota menší než A_1 . Další ochlazování probíhá buď velice pomalu v peci, kde se teplota snižuje asi o $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ každou hodinu, nebo se polotovar ponechá na teplotě 600 až $680\text{ }^{\circ}\text{C}$ až stovky hodin (podle velikosti průřezu polotovaru). Účelem této prodlevy je nechat vodík uniknout difuzí.

3.1.5 Žíhání pro odstranění křehkosti po moření [1], [9], [10], [11]

Moření se používá kvůli odstranění okují z povrchu součástí, spočívá v odstranění tenké vrstvy kovu z povrchové plochy. Obvykle se provádí ponořením součásti do lázně z kyseliny dusičné a fluorovodíkové. Při tomto procesu dochází k difuzi vodíku do kovu, což může mít za následek zkřehnutí oceli. Tento vodík se dá odstranit žíháním po dobu 1 až 4 hodin na teplotě 300 až $500\text{ }^{\circ}\text{C}$.

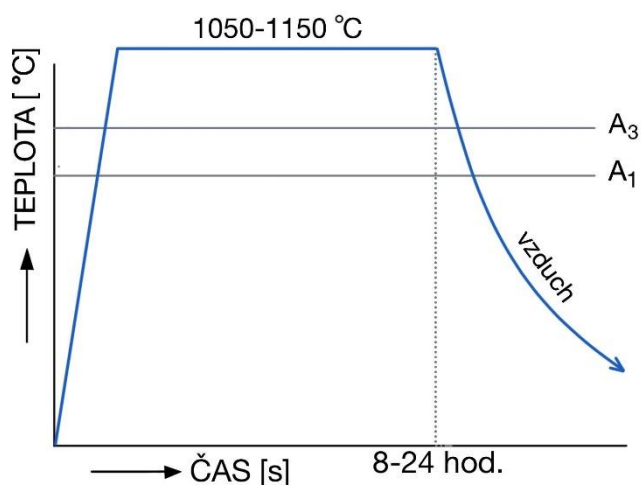
3.1.6 Žíhání rozpouštěcí [1], [9], [10], [11]

Cílem této metody je zlepšení tvárnosti, houževnatosti a korozivzdornosti. Používá se u nepolymorfních ocelí, s cílem rozpustit minoritní fáze (karbidy, nitridy) v tuhém roztoku. Jejich opětovnému vyloučení se zamezuje rychlým ochlazením na proudícím vzduchu nebo ve vodní/olejové lázni. Žíhání nepolymorfních ocelí probíhá na teplotách až $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$, u polymorfních se teploty pohybují pod A_1 .

3.2 Žíhání s překrystalizací

3.2.1 Homogenizační žíhání [1], [9], [10], [11], [16]

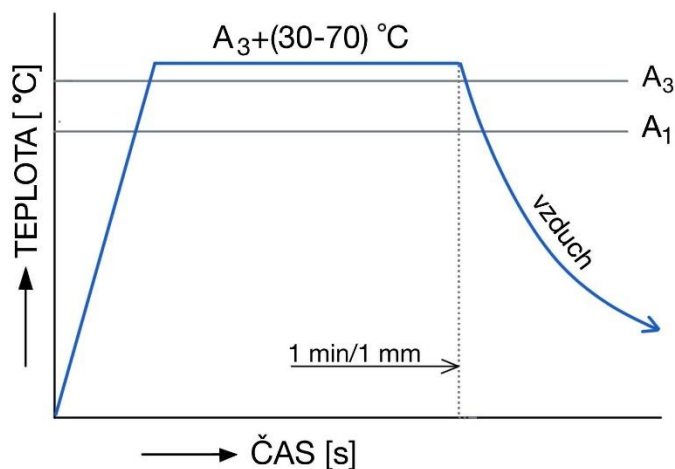
Při tuhnutí ingotů a odlitků jako důsledek dendritické segregace dochází k chemické heterogenitě. Homogenizační žíhání je proces, jehož účelem je heterogenitu zmenšit. Probíhá na teplotách mezi 1050 až $1150\text{ }^{\circ}\text{C}$, výdrž je v závislosti na hrubosti struktury mezi 5 až 15 hodinami. U polotovaru, který je dlouhodobě vystaven výdrži na takto vysokých teplotách dochází ke značné oxidaci, oduhličení povrchu a zhrubnutí austenitických zrn. To se řeší tepelným tvářením s následným rekrystalizačním či normalizačním žíháním. Schéma průběhu homogenizačního žíhání je znázorněno na obr. 20.



Obr. 20 Homogenizační žíhání [16]

3.2.2 Normalizační žíhání [1], [9], [10], [11], [16], [22], [23]

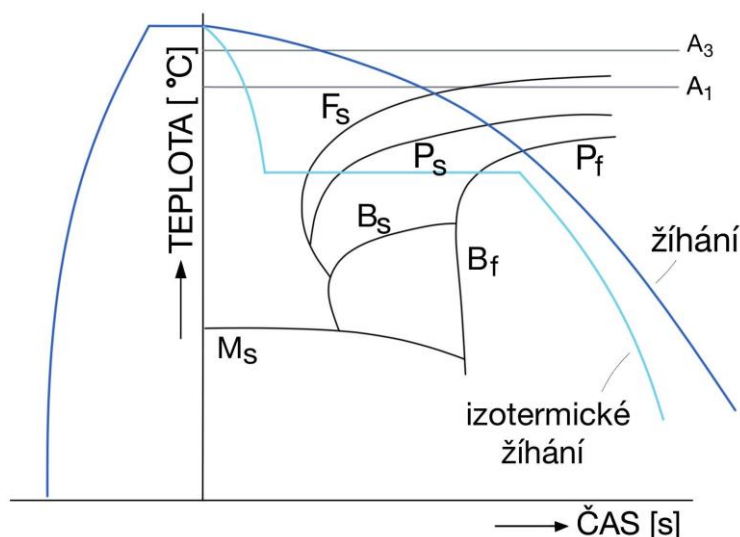
Cílem normalizace je dosáhnout homogenní jemnozrné struktury s dobrou obrobiteľnosťou. Používa sa na zjemnení struktury pro součásti vyrobené z uhlíkových a nízkolegovaných ocelí po kování, svařování, válcování za tepla nebo odlévání. Podéutektoidní oceli se ohřívají na teplotu 30 až 70 °C nad A_3 , ochlazuje se na vzduchu nebo v peci. Ochlazování v peci zajistí nízké vnitřní pnutí. Výslednou strukturu lze ovlivnit volbou vhodné rychlosti ochlazování v oblasti perlitické přeměny. Malé přechlazení zajistí hrubší, tvárnější a měkčí strukturu, větší přechlazení pak zase způsobí, že struktura bude jemnější, pevnější a tvrdší. U nadeutektoidních ocelí se normalizační žíhání používá zřídka, zpravidla k odstranění sekundárního cementitu. Schéma průběhu normalizačního žíhání je znázorněno na obr. 21.



Obr. 21 Normalizační žíhání [16]

3.2.3 Izotermické žíhání [1], [9], [10], [11], [16], [24]

Provádí se u slitinových ocelí s cílem zlepšení obrobiteľnosti a jakosti obráběného povrchu. Austenitizovaná ocel se rychle ochladí na teplotu izotermického rozpadu austenitu v oblasti perlitické přeměny (600 až 700 °C), na této teplotě setrvává 1 až 2 hodiny a následně se dochlazuje v peci nebo na vzduchu. Není vhodné pro velké vsázky, protože se nedá zaručit rovnoměrné a dostatečně rychlé ochlazení. Na obrázku č. 22 je zobrazena závislost teploty na čase pro izotermické žíhání.



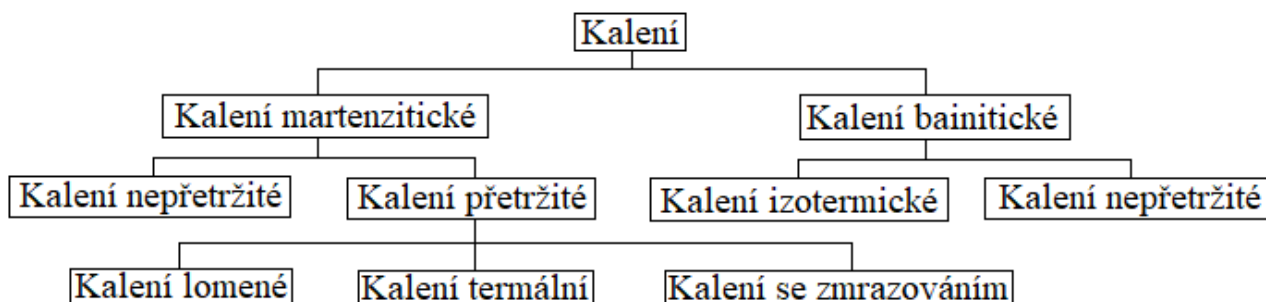
Obr. 22 Izotermické žíhání [16]

3.2.4 Kombinované žíhání [1], [9], [10], [11]

Tento způsob se skládá z normalizačního žíhání, po kterém bezprostředně následuje nějaký způsob žíhání bez překrystalizace (buď žíhání na měkko nebo žíhání ke snížení pnutí). Může nahrazovat žíhání s ochlazováním v peci u vysokouhlíkových nebo legovaných ocelí.

4 KALENÍ A POPOUŠTĚNÍ [1], [9], [10], [11]

Kalení je druh tepelného zpracování, které se provádí za účelem zvýšení tvrdosti oceli. K tomu dojde částečnou či úplnou přeměnou austenitu na martenzit či bainit. Podle této přeměny se kalení dělí na martenzitické a bainitické. Rozdělení způsobů kalení je na obr. 23.



Obr. 23 Rozdělení způsobů kalení [10]

4.1 Základní pojmy

4.1.1 Kalitelnost [1], [9], [10], [11]

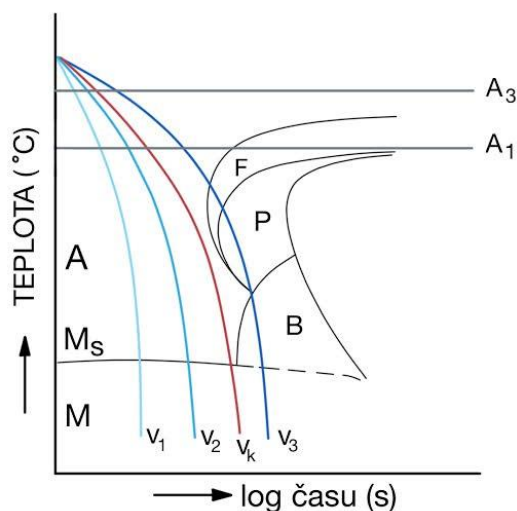
Tímto pojmem je označována schopnost oceli dosáhnout vyšší tvrdosti kalením, jinými slovy získat martenzitickou strukturu. Mezi nekalitelné oceli patří nízkouhlíkové a austenitické oceli.

4.1.2 Zakalitelnost [1], [9], [10], [11]

Zakalitelnost popisuje nejvyšší dosažitelnou tvrdost a je závislá především na obsahu uhlíku. Dobře kalitelné oceli jsou nelegované s více než 0,35 % uhlíku, naopak pokud je obsah uhlíku pod 0,2 %, je ocel nazakalitelná. Ocel se označuje jako zakalená, pokud má ve středu alespoň 50 % martenzitu. Nejvyšší dosažitelná tvrdost martenzitu se pohybuje okolo 950 HV. Karbidotvorné prvky jako chrom či wolfram mohou mít pozitivní účinek na tvrdost, ostatní prvky na kalení nemají zásadní vliv.

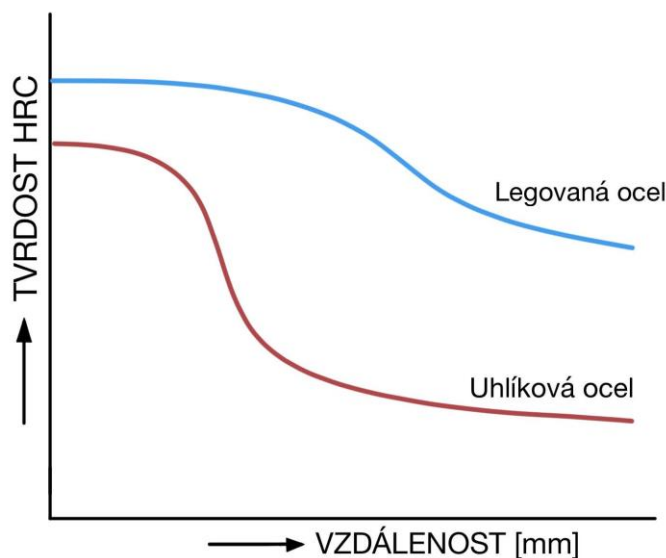
4.1.3 Prokalitelnost [1], [9], [10], [11]

Jelikož součást nechladne v celém objemu rovnoměrně, byl zaveden parametr zvaný prokalitelnost, který popisuje schopnost dosáhnout požadovaného stupně zakalitelnosti do určité hloubky. Je ovlivněn především rychlostí ochlazování. Větší součásti je možné zakalit pouze do určité hloubky. Na obrázku č. 24 a 25 jsou schémata průběhu ochlazování v ARA diagramu uhlíkové a legované oceli. U uhlíkové oceli je patrné, že povrchové vrstvy chladnou rychleji, než je kritická rychlost kalení ($v_1, v_2 > v_k$). Tyto vrstvy budou po zakalení mít martenzitickou strukturu. Střed součásti však chladne pomaleji, než je kritická



Obr. 24 Průběh ochlazování válcového tělesa z uhlíkové oceli [1]

rychlost kalení ($v_3 < v_k$). To znamená, že k zakalení zde nedojde a struktura bude tvořena směsí feritu, perlitu, bainitu a martenzitu. Situace u legované oceli se liší tím, že zde je menší kritická rychlost kalení, tudíž dojde k zakalení celého průřezu. Prokalitelnost se ověřuje pomocí Jominyho zkoušky prokalitelnosti. Tato zkouška spočívá v austenitizaci standartního válcového vzorku ($\varnothing 25$ mm, délka 100 mm) a následném ochlazování čela proudem vody, viz obr. 27. Po zakalení se po celé délce válečku změří tvrdost a je sestrojena tzv. křivka prokalitelnosti, která graficky zobrazuje závislost tvrdosti na vzdálenosti od čela, příklad takové křivky je na obrázku č. 26.

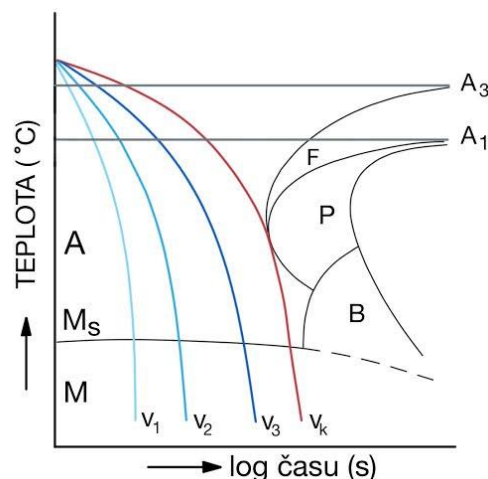


Obr. 26 Křivka prokalitelnosti [1]

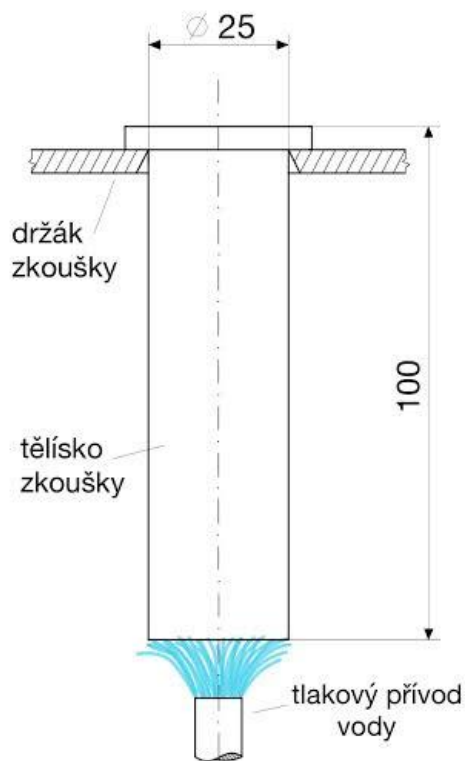
4.1.4 Kalicí teplota [1], [9], [10], [11]

Teplota kalení musí být zvolena tak, aby bylo v co nejkratším čase dosaženo homogenizace austenitu a zároveň zachována jemnozrnná struktura. Jak lze vidět na obrázku č. 28, u podeutektoidních ocelí se pásmo kalicích teplot v diagramu Fe-Fe₃C pohybuje 30 až 50 °C nad A_{c3}. Pokud by teplota byla nižší, ve výsledné struktuře se bude v martenzitu vyskytovat ferit, což ubírá na výsledné tvrdosti a zvyšuje vnitřní pnutí. Je žádoucí, aby proběhla přeměna veškerého feritu na austenit. Naopak překročení optimální kalicí teploty nebo moc dlouhá výdrž na kalicí teplotě způsobí zvýšený růst austenitického zrna a větší křehkost martenzitu po ochlazení.

Ideální kalicí teplota pro nadeutektoidní oceli se pohybuje 30 až 50 °C nad teplotou A_{c1}. Správná teplota a doba výdrže zajistí, že ve výsledné struktuře zůstane určitý podíl zbytkového

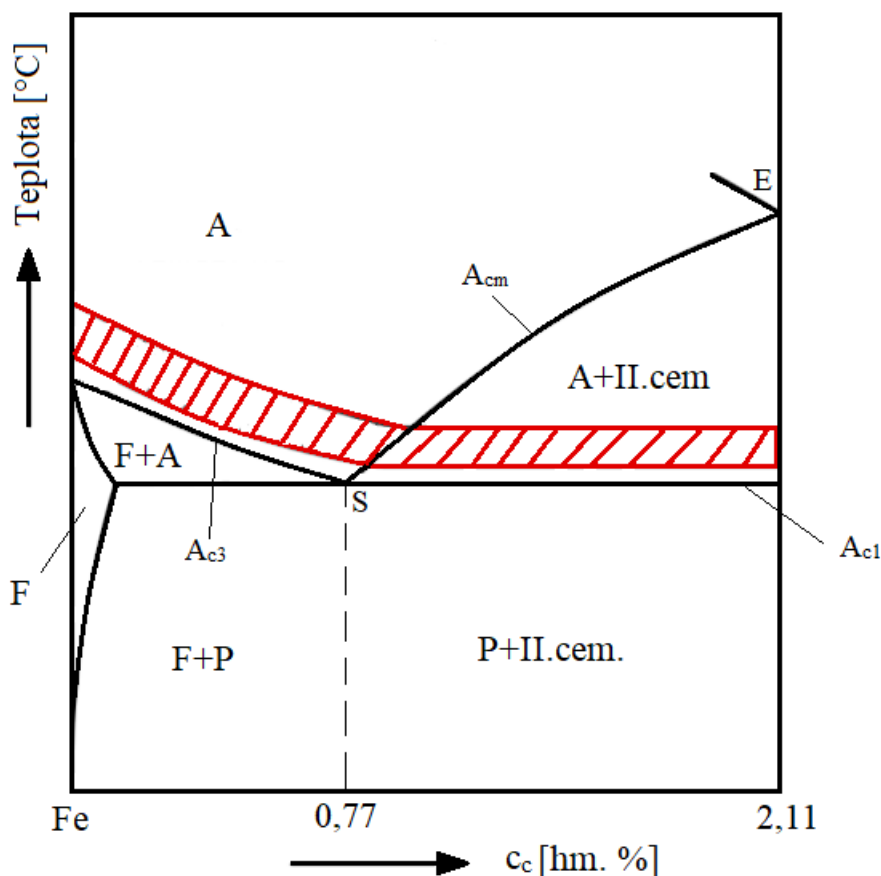


Obr. 25 Průběh ochlazování válcového tělesa z legované oceli [1]



Obr. 27 Jominyho zkouška [11]

austenitu a nerozpuštěného sekundárního cementitu, který zvyšuje tvrdost a odolnost proti otěru. Před kalením nadeutektoidních ocelí je vhodné zařadit žhání na měkko, protože velkou roli v konečném výsledku hraje rovnoměrné rozložení cementitu před kalením. Překročením teploty A_{cm} dojde k rozpuštění sekundárního cementitu, zhrubnutí austenitického zrna a větší koncentraci uhlíku v austenitu. Po zakalení je větší podíl uhlíku v martenzitu, což má za následek větší strukturní pnutí a vznik mikrotrhlin. Struktura martenzitu je hrubší a obsahuje více zbytkového austenitu, je měkčí, křehčí a teplotně méně stabilní, což je u kalení nežádoucí.



Obr. 28 Pásmo kalících teplot v diagramu Fe-Fe₃C [1]

4.1.5 Kalící prostředí [1], [9], [10], [11], [25]

Účelem kalícího prostředí je ochladit určitý objem rychlostí lehce vyšší, než je rychlost kritická. Optimální je, pokud největší účinnost prostředí má v oblasti perlitické přeměny (650 až 550 °C) a relativně malou účinnost v oblasti martenzitické přeměny (350 až 250 °C). Pokud je rychlost vyšší než kritická, dochází ke zvýšení vnitřního pnutí. Účinnost prostředí se odvíjí od jeho tepelné vodivosti, měrném a výparném teple a na jeho viskozitě. Na obr. 29 jsou zobrazeny křivky získané ochlazováním vzorku o průměru 10 mm, kaleném na teplotu 850 °C, který byl ochlazován různými způsoby. Používané chladicí média jsou:

a) Voda

Nejvíce využívaným chladicím médiem je díky její snadné dostupnosti, nízké ceně, nehořlavosti a vhodným vlastnostem voda. Kalení probíhá do vody, která má teplotu cca. 20 °C. Její nevýhodou je, že ochlazování v ní neprobíhá rovnoměrně, což je způsobeno vznikem parního polštáře. Do určité míry se tomu dá zabránit pohybem vody, nejúčinnější je vodní sprcha. Oproti jiným chladicím médiím vzniká kalením do vody vždy poměrně velké vnitřní pnutí, způsobené velkou rychlostí ochlazování v oblasti martenzitické přeměny. Používá se převážně pro kalení součástí z nelegovaných ocelí.

Lepší ochlazovací účinnosti vody se dá dosáhnout přidáním solí (NaCl, NaNO₃, KNO₃), kyselin (H₂SO₄) nebo hydroxidů (NaOH)

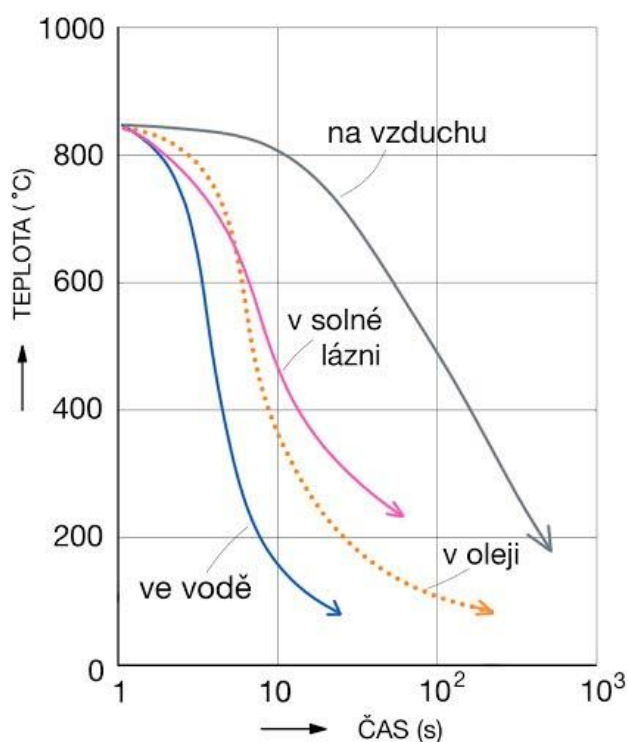
b) Olej

Kalení do oleje probíhá podobně jako do vody, oleje mají však mnohem menší rychlost ochlazování, zhruba 3x pomalejší v oblasti perlitické přeměny a až 10x pomalejší v oblasti martenzitické přeměny, což zajišťuje menší vnitřní pnutí. Další výhodou oleje je, že je stále stejně účinný i ve vyšších teplotách. Počáteční teplota oleje před kalením bývá zpravidla 50 °C. Olej na rozdíl od vody není nehořlavý, hrozí tedy nebezpečí vznícení a taky je méně šetrný k životnímu prostředí. Lze jej použít opakovaně, ale musí být čistý, čirý, s dobrou viskozitou. Časem olej vlivem oxidace, znečištění prachem a okujemi, uhelnatěním a pryskyřičnatěním stárne a je nutné jej vyměnit.

Nejčastěji se používají minerální oleje, do kterých se přidávají aditiva, méně rozšířené jsou syntetické oleje. Do oleje se kalí nejčastěji součásti z nízkolegovaných ocelí.

c) Vzduch

Pro kalení vysoce legovaných ocelí s hlubokou prokalitelností (tzv. samokalitelné oceli) se většinou používá vzduch. Průběh ochlazování je u tohoto způsobu nejplynulejší, rozdíly mezi povrchovou teplotou a teplotou uprostřed součásti nejsou moc velké, vzniká tedy nejmenší vnitřní pnutí. Ke zlepšení ochlazovacího účinku je vzduch na součást vháněn pod tlakem cca 10 kPa, případně může být kombinován s vodou ve formě vodní mlhy. Součást by měla být ochlazována rovnoměrně ze všech stran, tak aby nevznikaly velké rozdíly teplot.

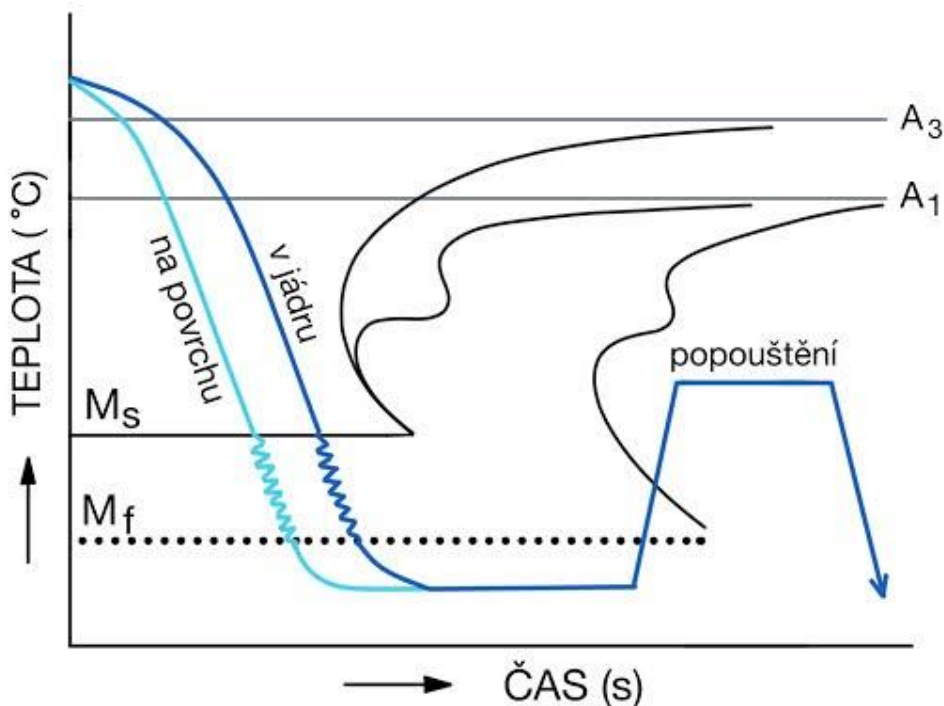


Obr. 29 Srovnání kalících prostředí [10]

4.2 Martenzitické kalení

4.2.1 Nepřetržitě kalení [1], [9], [10], [11]

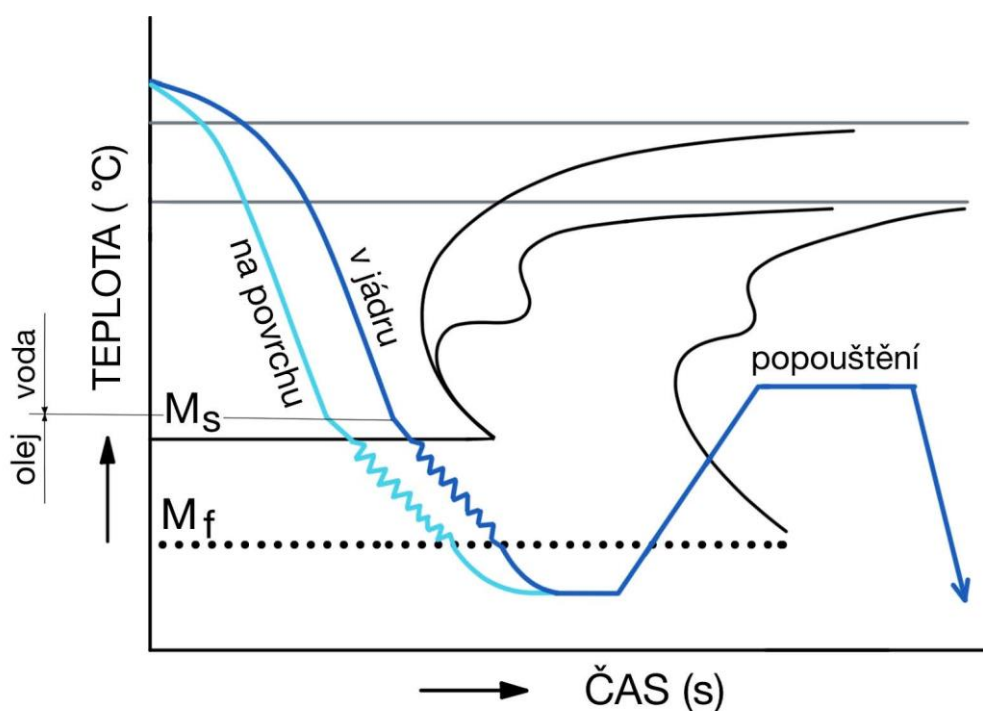
Jedná se o nejzákladnější, nejjednodušší způsob kalení. Prvním krokem je ohřev na kalicí teplotu, druhým je výdrž na teplotě, dokud nedojde k homogenizaci austenitu. Ochladuje se nepřetržitě v jednom ochlazovacím prostředí. Je to nenáročný a poměrně levný způsob, ale zvláště při kalení do vody jsou zde velká vnitřní pnutí, při kterých může dojít až k prasknutí kalené součásti. Po nepřetržitém kalení zpravidla následuje popouštění, viz obr. 30.



Obr. 30 Nepřetržitě kalení [10]

4.2.2 Lomené kalení [1], [9], [10], [11]

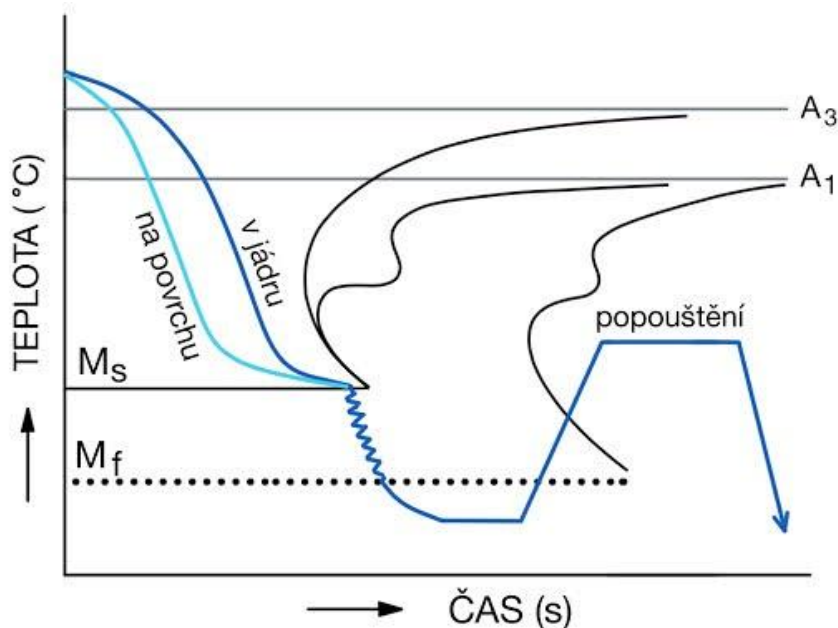
Tento způsob kalení spočívá v tom, že se součást nejdříve ochlazuje v prostředí s větší ochlazovací rychlostí a těsně před tím, než teplota klesne do oblasti martenzitické přeměny se součást vyjme a vloží do jiné lázně s mírnějším průběhem ochlazování, viz obr. 31. Buď se nejdříve ochlazuje ve vodě a poté v oleji nebo se začíná olejem a poté se dochlazuje vzduchem. Používá se při kalení součástí komplexních tvarů, u kterých by při nepřetržitém kalení hrozilo prasknutí. Dále se používá pro velké součásti, které vzhledem k rozměrům vyžadují efektivnější ochlazování v oblasti perlitické přeměny, ale v oblasti martenzitické přeměny by rychlé ochlazování opět způsobovalo praskání. Nevýhodou může být poměrně složité určování správné teploty pro změnu ochlazovacího prostředí.



Obr. 31 Lomené kalení [10]

4.2.3 Termální kalení [1], [9], [10], [11], [26]

První krok tohoto způsobu kalení je ochlazení v solné lázni o teplotě okolo 20 až 30 °C nad teplotou martenzitické přeměny. Cílem je, aby teplota na povrchu a v jádru byla co nejbližší a tím se minimalizovalo teplotní pnutí. Maximální doba, po kterou může součást setrvat v lázni je omezena do bodu, kdy by začal vznikat bainit. Po vyjmutí z lázně se součást dochlazuje na klidném vzduchu. Využívá se hlavně pro kalení menších součástí složitého tvaru, které se stihnou rovnoměrně prohřát, než začne vznikat bainit, z nelegovaných a nízkolegovaných ocelí. Průběh termálního kalení je zobrazen na obr. 32.



Obr. 32 Termální kalení [10]

4.2.4 Kalení se zmrazováním [1], [9], [10], [11], [27]

U výrobků jako jsou např. měřidla nebo přesná valivá ložiska je velice důležitým parametrem rozměrová stabilita. Ty se většinou vyrábí z ocelí, které mají teplotu M_f (teplota dokončení martenzitické přeměny) menší než $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. V co nejkratším čase po zakalení se součást zmrazí, aby se minimalizovala stabilizace zbytkového austenitu. Určité procento austenitu ve struktuře vždy zůstane, odstraňuje se popouštěním. Ke zmrazení se používá směs lihu a tuhého CO_2 (cca. $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$), průmyslové mrazáky s teplotou zmrazení do cca $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ nebo tekutý dusík s teplotou až $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$. Jedná se o poměrně nákladnou technologii.

4.3 Bainitické kalení [1], [9], [10], [11], [28], [29]

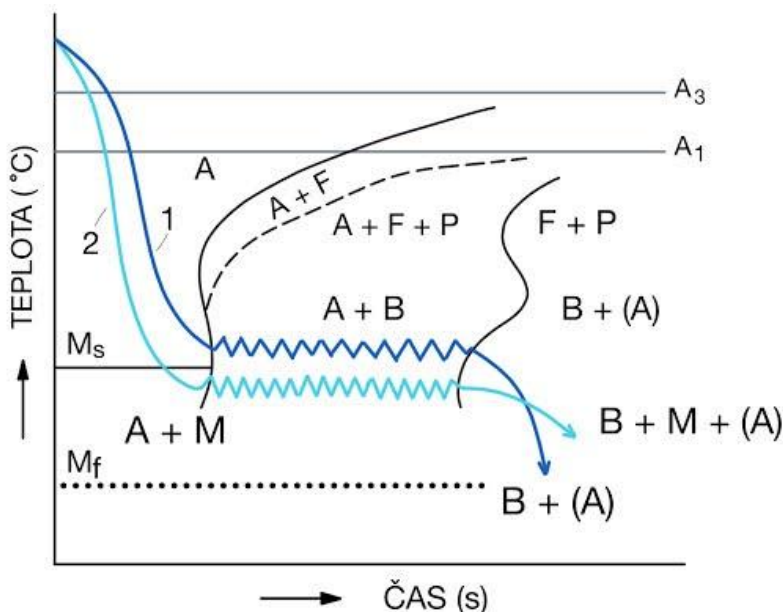
Cílem bainitického kalení je získat strukturu, která je tvrdá, ale zároveň houževnatá, na rozdíl od kalení martenzitického, kde výsledná struktura je tvrdá, ale křehká. Bainit je směs feritu a cementitu, která vzniká v oblasti bainitické přeměny, v rozmezí teplot 250 až $550\text{ }^{\circ}\text{C}$.

4.3.1 Izotermické zušlechťování [1], [9], [10], [11]

Tento proces je podobný termálnímu kalení, součást se po nahláti na kalicí teplotu vloží do solné lázně nebo lázně z roztavených kovů, která má teplotu bainitické přeměny (cca. 300 až $400\text{ }^{\circ}\text{C}$). Teplota výdrže určuje výslednou strukturu, čím vyšší teplota, tím vyšší houževnatost a měkčí struktura. Na rozdíl od termálního kalení, kde je to nežádoucí, zde setrvává až do dokončení bainitické transformace. Dochlazuje se na vzduchu. Takto zakalená ocel vykazuje minimální vnitřní pnutí, není tedy již třeba popouštět. Používá se pro součásti se střední prokalitelností, tedy středně a nízkolegované, spíše menších rozměrů.

4.3.2 Izotermické kalení [1], [9], [10], [11]

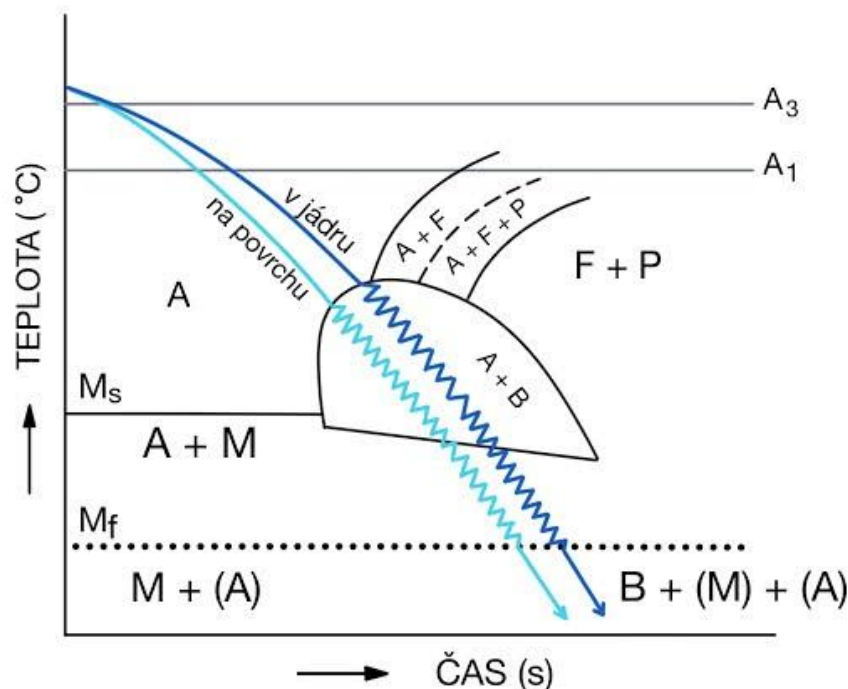
Izotermické kalení se od izotermického zušlechťování liší teplotou výdrže a výslednou strukturou. Teplota výdrže se pohybuje těsně pod teplotou M_s a výsledná struktura obsahuje bainit, zbytkový austenit a martenzit, viz obr. 33. Oproti zušlechťování je zde i vyšší vnitřní pnutí, součásti je tedy nutné popouštět.



Obr. 33 (1) – izotermické zušlechťování, (2) - izotermické kalení [10]

4.3.3 Nepřetržité bainitické kalení [1], [9], [10], [11]

Předpokladem pro nepřetržité bainitické kalení je vhodná volba materiálu. Je možné pouze u ocelí, které mají v diagramu ARA předstunutou bainitickou oblast, viz obr. 34. Poté je nutné součást dostatečně rychle plynule ochlazovat tak, aby se austenit rozpadl na bainit nebo na směs bainitu a martenzitu. Součásti kalené tímto způsobem se musí popouštět.



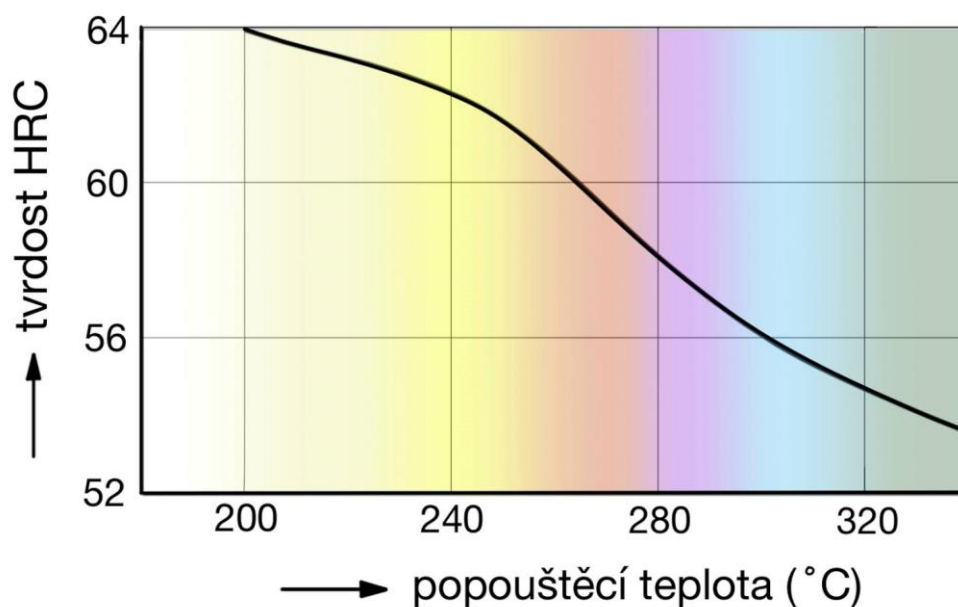
Obr. 34 Nepřetržité kalení [10]

4.4 Popouštění [1], [9], [10], [11], [30], [31]

Popouštění je technologický proces, který v drtivé většině případů následuje hned po kalení. Kalené součásti jsou sice tvrdé, ale křehké a v praxi víceméně nepoužitelné. Cílem popouštění je snížit vnitřní pnutí a zlepšit jejich houževnatost. Principem je ohřev martenzitické struktury na popouštěcí teplotu, která je nižší než A_1 a výdrž na této teplotě obvykle dvě hodiny a více, podle velikosti součásti. Podle teploty, na kterou se provádí ohřev se rozlišuje nízkoteplotní popouštění, tzv. napouštění a vysokoteplotní popouštění, kterému se v kombinaci s kalením říká zušlechťování.

4.4.1 Popouštění za nízkých teplot [1], [9], [10], [11], [30], [31]

Teploty napouštění se pohybují do $350\text{ }^{\circ}\text{C}$. Hlavní využití je u nástrojových ocelí, kde je důležité snížit citlivost na nárazy při práci a zachovat jejich tvrdost. Lze popouštět celý nástroj nebo jenom jeho část. Při částečném popouštění se nejdříve popustí celý nástroj na nízkou teplotu a potom se část, která se při práci nepoužívá (např. stopka nástroje) popustí ještě jednou na vyšší teplotu, což zajistí, že pracovní část zůstane tvrdá. Pokud popouštění probíhá na vzduchu, lze na součásti pozorovat změnu barvy, která je způsobena interferencí světla v tenké oxidační vrstvě na povrchu součásti. Každá barva koresponduje s určitou popouštěcí teplotou, závislost popouštěcí teploty a tvrdosti společně s odpovídajícími barvami je na obr. 35.



Obr. 35 Pokles tvrdosti kalené nelegované nástrojové oceli v závislosti na popouštěcí teplotě [10]

4.4.2 Popouštění za vysokých teplot [1], [9], [10], [11], [30], [31]

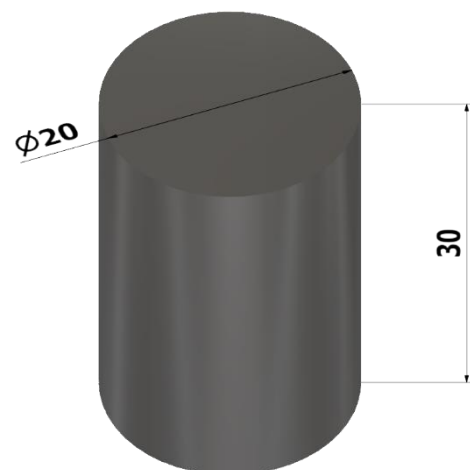
Kýženým efektem po popouštění za vysokých teplot je získat součást s vysokou mezí kluzu, vysokou mezí únavy a dobrou houževnatostí. Probíhá při teplotách mezi 400 až 650 °C. V praxi se využívá například k zušlechťování pružin, u kterých je zásadním parametrem mez pružnosti nebo pro nástrojové a rychlořezné oceli tvářené za tepla.

5 EXPERIMENT

Experimentální část této práce si klade za cíl ověřit a analyzovat vliv deformačního procesu a tepelného zpracování na vlastnosti tvářené oceli. Jako deformační proces bylo zvoleno pěchování a jako tepelné zpracování bylo zvoleno rekrystalizační žíhání, žíhání na měkko, kalení a popouštění. Experiment probíhal v prostorách VUT FSI na odboru technologie tváření kovů a plastů.

5.1 Vzorky, materiál

Experimenty byly prováděny na vzorcích z konstrukční oceli C45, dle norem ČSN 12050, která byla dodána firmou Třinecké Železárny – Moravia Steel. Jedná se o uhlíkovou ocel vhodnou k zušlechťování a povrchovému kalení. V praxi se využívá například na hřídele těžních strojů, karuselů apod., na větší ozubená kola, písty kompresorů, dopravní válečky, vrtací tyče, frézovací trny, spojovací součásti, kované svorníky tlakových nádob a další. Tato ocel obsahuje 0,46 % uhlíku, kompletní chemické složení je v tab. 2, v tab. 3 jsou uvedeny mechanické hodnoty. Ocel byla dodána v tyčích o průměru 20 mm a nařezána na válečky s výškou 30 mm, viz obr. 36.



Obr. 36 Rozměry vzorku

Tab. 2 Chemické složení oceli C45 [32]

| Chemické složení [%] | | | | | | | |
|----------------------|------|------|-------|-------|------|------|-------|
| C | Mn | Si | P | S | Cr | Ni | Mo |
| 0,46 | 0,69 | 0,23 | 0,014 | 0,007 | 0,10 | 0,05 | 0,011 |

Tab. 3 Mechanické vlastnosti oceli C45 [32]

| Mez kluzu Re [MPa] | Mez pevnosti Rm [MPa] | Tažnost A [%] | Kontrakce Z [%] |
|---------------------------|------------------------------|----------------------|------------------------|
| 420 – 422 | 688 – 693 | 21,7 – 22,3 | 35,3 – 36,7 |

5.2 Měření tvrdosti

Ověřovaným parametrem byla tvrdost. Jako způsob měření byla použita zkouška tvrdosti podle Vickerse, se zatížením 5 kilogramů. K tomuto účelu má odbor technologie tváření kovů a plastů tvrdoměr Zwick 3212, který byl modernizován kamerovým systémem, který přenáší obraz do počítače. Software testXpert, taktéž od firmy Zwick Roell potom na základě tohoto obrazu změří délky obou úhlopříček čtyřbokého vtisku a vypočítá tvrdost. Na obr. 37. je zachyceno softwarové vyhodnocování vtisku a na obr. 39 je tvrdoměr Zwick 3212.

Každá metoda byla provedena na třech vzorcích a na každém vzorku bylo provedeno pět vtisků. Měření tvrdosti probíhalo na čele vzorku, vtisky byly prováděny od kraje přes střed do druhého kraje, viz obr. 38. Jako první byla naměřena tvrdost oceli v dodaném stavu, tyto



Obr. 37 Vyhodnocování vtisku

hodnoty jsou zapsány v tab. 4. Průměrná hodnota tvrdosti vzorků v dodaném stavu byla zhruba 145.



Obr. 39 Rozmístění vtisků na vzorku



Obr. 38 Tvrdoměr Zwick 3212

Tab. 4 Tvrdost v dodaném stavu

| (HV = 5) | Vzorek č. 1 | Vzorek č. 2 | Vzorek č. 3 |
|----------|-------------|-------------|-------------|
| 1. vtisk | 144 | 147 | 143 |
| 2. vtisk | 144 | 147 | 143 |
| 3. vtisk | 140 | 145 | 142 |
| 4. vtisk | 149 | 145 | 145 |
| 5. vtisk | 143 | 142 | 147 |
| Průměr | 145 | | |

5.3 Pěchování

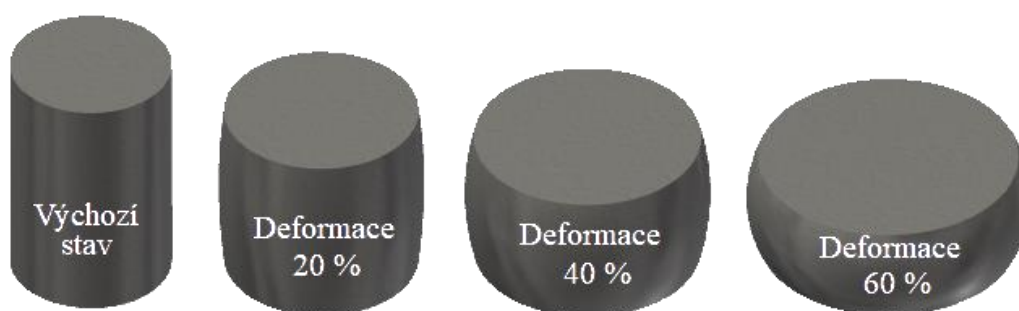
K ověření vlivu deformace na tvrdost vzorků bylo vybráno volné pěchování mezi rovnoběžnými plochami. Pěchování probíhalo na hydraulickém lise CZR 500 (obr. 40). Pěchovány byly tři vzorky, první byl deformován o 20 %, druhý o 40 % a třetí o 60 %. Výsledky měření tvrdosti jsou zapsány v tab. 5, grafické porovnání velikosti deformace je na obr. 41.



Obr. 40 Lis CZR 500

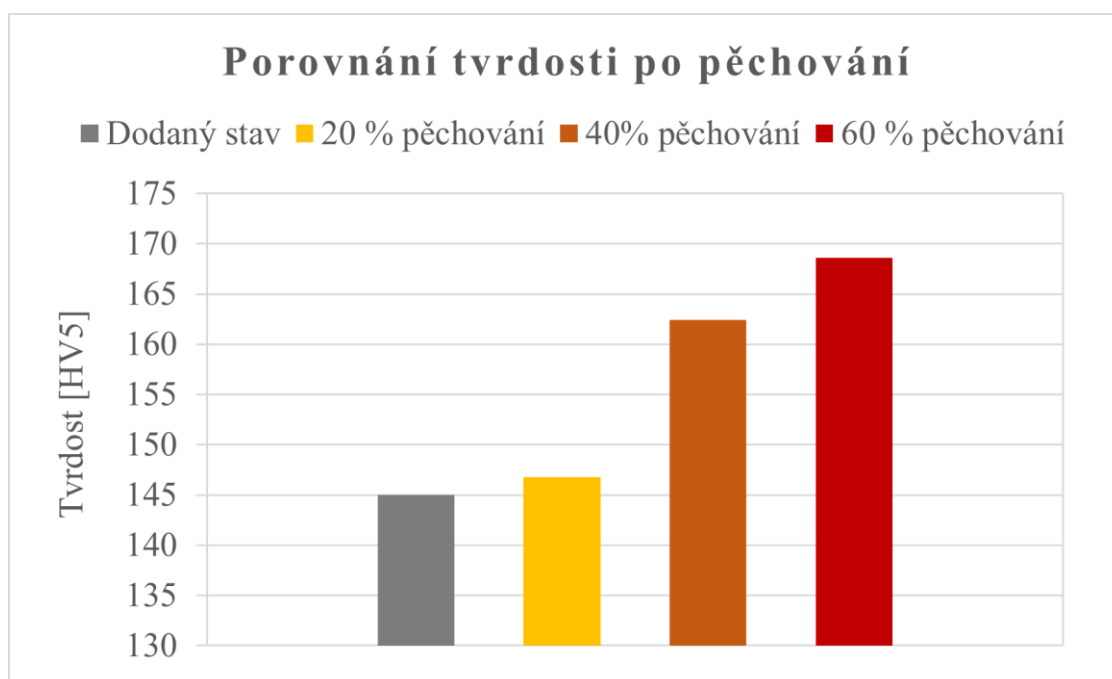
Tab. 5 Tvrdost po p chov n 

| (HV = 5) | Vzorek  . 1 (20%) | Vzorek  . 2 (40%) | Vzorek č. 3 (60%) |
|----------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 1. vtisk | 146 | 167 | 165 |
| 2. vtisk | 148 | 166 | 170 |
| 3. vtisk | 148 | 159 | 166 |
| 4. vtisk | 146 | 160 | 168 |
| 5. vtisk | 146 | 160 | 174 |
| Průměr | 147 | 162 | 169 |



Obr. 41 Srovnání velikosti deformace

Výsledky měření byly zpracovány do grafu (obr. 42) ze kterého je patrn , že u vzorku, kter  byl pěchován o 20 %, je deformační zpevnění minim ln . Z p vodn  pr m rn  hodnoty v dodaném stavu 145 se zvedl zhruba na 147, což je nárůst o necelých 1,4 %. U válečků p chov n ch na 40 a 60 % je deformační zpevnění poněkud patrnější, jedná se o nárůst tvrdosti zhruba o 12 % u vzorku č. 2 a 16 % u vzorku č. 3.



Obr. 42 Porovnání tvrdosti po p chov n 

5.4 Rekrystalizace

Napěchované vzorky byly dále tepelně zpracovány rekrystalizací. Ohřev byl prováděn v komorové peci, viz obr. 44. Pec byla rozežhřáta na 600 °C a na této teplotě byly vzorky drženy po dobu 4 hodin. Po vyjmutí byly ochlazovány na klidném vzduchu. Pro účely měření byla čela všech vzorků vybroušena na metalografické brusce, viz obr. 43. Naměřené hodnoty jsou zapsány v tab. 6.



Obr. 43 Napěchované, rekrystalizované vzorky s vybroušenými čely

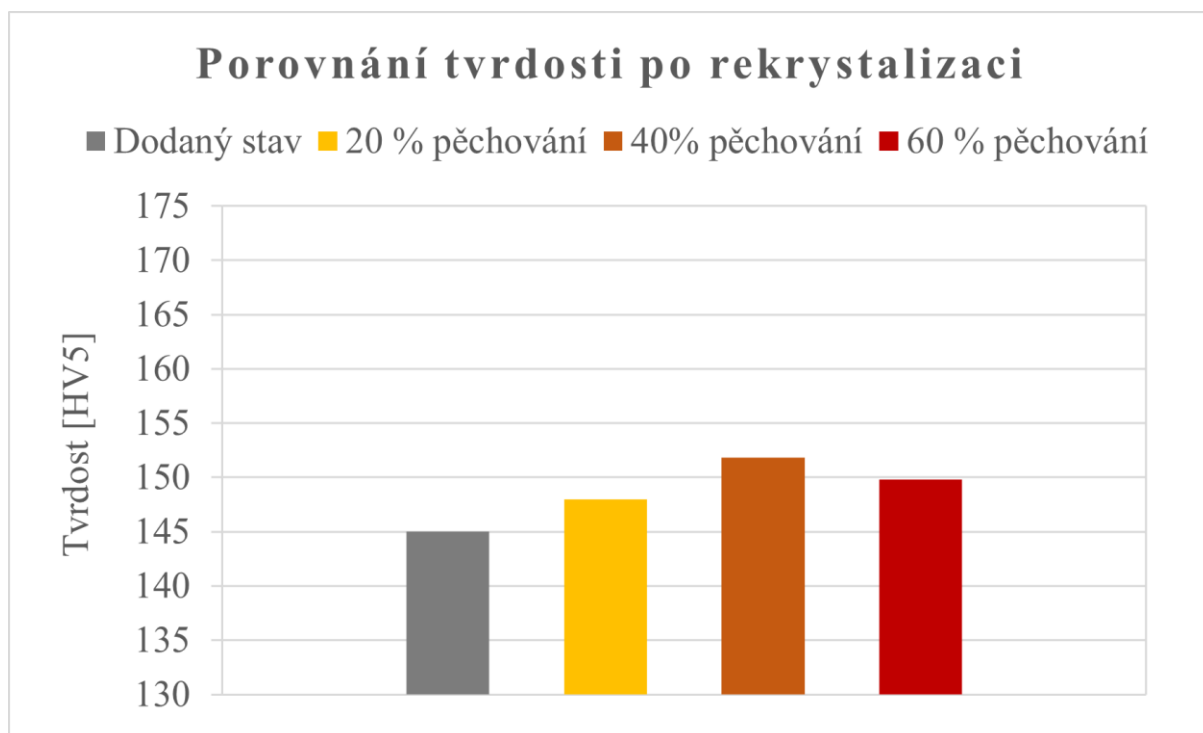
Tab. 6 Tvrdost po rekrystalizaci

| (HV = 5) | Vzorek č. 1 (20%) | Vzorek č. 2 (40%) | Vzorek č. 3 (60%) |
|----------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 1. vtisk | 144 | 159 | 154 |
| 2. vtisk | 150 | 153 | 152 |
| 3. vtisk | 147 | 150 | 149 |
| 4. vtisk | 152 | 153 | 147 |
| 5. vtisk | 147 | 144 | 147 |
| Průměr | 148 | 152 | 150 |

Průměrná hodnota tvrdosti prvního vzorku s deformací 20 % je 148, což je víceméně stejná hodnota jako před rekrystalizačním žháním. Druhý vzorek, který měl po pěchování průměrnou tvrdost 162 se rekrystalizací dostal na průměrnou hodnotu 152 a tvrdost třetího vzorku ze 169 klesla na 150. Cílem rekrystalizace je obnovení tvárných vlastností a nahrazení deformované struktury, novou jemnozrnnou strukturou. Z tohoto hlediska lze tedy považovat tento experiment za úspěšný. Nezávisle na velikosti deformace před rekrystalizací se všechny tři vzorky dostaly na podobné hodnoty tvrdosti, což lze pozorovat na grafu na obr. 45.



Obr. 44 Komorová pec



Obr. 45 Porovnání tvrdosti po rekrytalizaci

5.5 Źihání na mēkko

Další tři vzorky byly Źihány na mēkko. Teplota Źihání byla zvolena 690 °C, výdrž na této teplotě byla 8 hodin a následné ochlazování probíhalo v peci. Na tepelně zpracovaných vzorcích byla vybroušena kvalitní plocha a provedeno měření tvrdosti. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tab. 7.

Tab. 7 Tvrdost po Źihání na mēkko

| (HV = 5) | Vzorek č. 1 | Vzorek č. 2 | Vzorek č. 3 |
|----------|-------------|-------------|-------------|
| 1. vtisk | 117 | 116 | 115 |
| 2. vtisk | 110 | 118 | 114 |
| 3. vtisk | 107 | 108 | 119 |
| 4. vtisk | 112 | 111 | 110 |
| 5. vtisk | 115 | 114 | 112 |
| Průměr | 113 | | |

Cílem Źihání na mēkko je snížení tvrdosti a zlepšení tvárnosti a obrobiteľnosti. Průměrná hodnota tvrdosti po tepelném zpracování byla stanovena na 113, což je oproti tvrdosti vzorků v dodávaném stavu pokles o 22 %. Tento experiment lze považovat za úspěšný.

5.6 Kalení a popouštění

K tomuto experimentu bylo zvoleno nepřetržité kalení do vody. Kalení bylo prováděno v peci při kalící teplotě 800 °C. Doba kalení od založení vzorků do pece byla 2 hodiny a jako chladicí prostředí byla použita voda. Zakalené vzorky byly připraveny na metalografické brusce a byly naměřeny hodnoty tvrdostí. Naměřené hodnoty jsou zapsány v tab. 8.

Tab. 8 Tvrdost po kalení

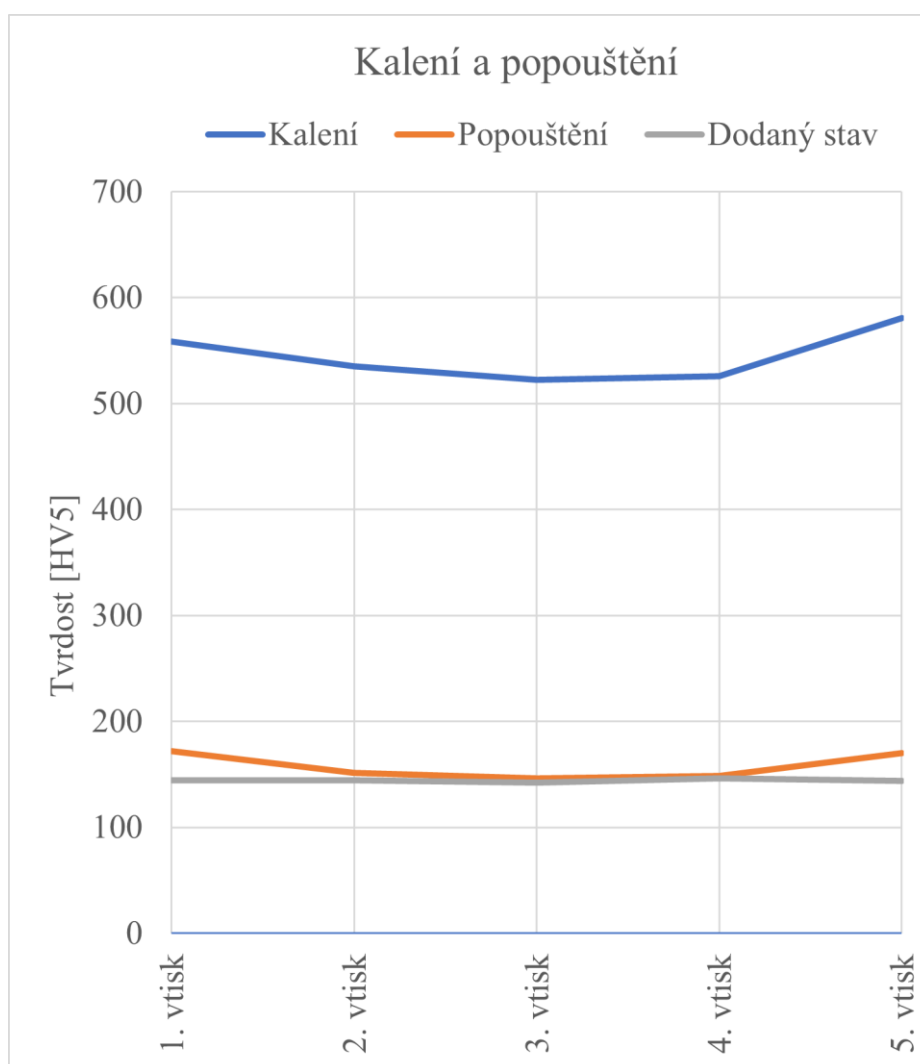
| (HV = 5) | Vzorek č. 1 | Vzorek č. 2 | Vzorek č. 3 |
|----------|-------------|-------------|-------------|
| 1. vtisk | 543 | 564 | 568 |
| 2. vtisk | 525 | 543 | 537 |
| 3. vtisk | 514 | 531 | 522 |
| 4. vtisk | 514 | 543 | 520 |
| 5. vtisk | 623 | 555 | 564 |
| Průměr | 544 | | |

Na naměřených hodnotách je patrný rozdíl mezi hodnotami tvrdosti na okrajích vzorků (1. a 5. vtisk) a uprostřed vzorků (3. vtisk). Tvrdost na okrajích je větší, ve středu menší. Tato skutečnost souvisí s prokalitelností oceli. Jelikož vzorek nechladne v celém průřezu rovnoměrně, liší se i tvrdost. Celková průměrná tvrdost vyšla 544, což je nárůst tvrdosti o 275 % oproti tvrdosti materiálu v dodaném stavu.

Kalením byla vytvořena tvrdá, ale křehká struktura s vysokým vnitřním pnutím, takže další experiment na stejných třech vzorcích bylo popouštění. Teplota popouštění byla 600 °C, při které byly vzorky popouštěny 1 hodinu. Ochlazování probíhalo na vzduchu. Na popouštěných vzorcích byly opět na metalografické brusce vytvořeny kvalitní plochy a naměřena tvrdost. Hodnoty tvrdosti jsou uvedeny v tab. 9. Na obr. 46 jsou naměřené hodnoty zanesené do grafu, na kterém je dobře viditelný rozdíl v tvrdosti na okrajích a ve středu vzorků.

Tab. 9 Tvrdost po popouštění

| (HV = 5) | Vzorek č. 1 | Vzorek č. 2 | Vzorek č. 3 |
|----------|-------------|-------------|-------------|
| 1. vtisk | 171 | 179 | 166 |
| 2. vtisk | 154 | 147 | 154 |
| 3. vtisk | 133 | 136 | 170 |
| 4. vtisk | 145 | 146 | 155 |
| 5. vtisk | 182 | 157 | 172 |
| Průměr | 158 | | |



Obr. 46 Srovnání tvrdosti mezi jednotlivými vtisky

6 ZÁVĚR

První, rešeršní část této bakalářské práce se zabývala teorií tváření a tepelného zpracování. Pojednávala primárně o metodách tepelného zpracování využívaných při přípravě polotovarů, výlisků a výkovků. Konkrétně šlo o metody žíhání, kalení a popouštění.

V druhé části bylo provedeno několik experimentů. Prováděny byly na válečcích o průměru 20 mm a délce 30 mm z oceli C45. Ověřovaným parametrem byla tvrdost. První experiment měl za cíl analyzovat vliv deformačního procesu na vlastnosti tvářených součástí. Tři vzorky byly deformovány pěchováním o 20 %, 40 % a 60 %. Deformační zpevnění prvního vzorku bylo zanedbatelné, další dva vzorky zaznamenaly nárůst tvrdosti o 12 % a 16 %.

Druhý experiment byl prováděn na stejných třech vzorcích, které byly rekrystalizačně žíhány 4 hodiny při teplotě 600 °C, s následným ochlazováním na vzduchu. Přesto, že před rekrystalizací se jejich tvrdost poměrně výrazně lišila, po tepelném zpracování byla u všech vzorků prakticky stejná. Experiment byl tedy úspěšný a potvrdil, že rekrystalizací se součástem obnoví tvárné vlastnosti a deformovaná struktura je nahrazena novou, jemnozrnnou strukturou.

Třetí experiment ověřoval na třech vzorcích vliv žíhání na měkko. Žíhací teplota byla 690 °C, doba žíhání 8 hodin, ochlazovalo se v peci. Vzorky po tepelném zpracování vykazovaly průměrně o 22 % nižší tvrdost, než měla ocel v dodaném stavu. Žíhání na měkko se provádí z důvodu snížení tvrdosti a zlepšení obrobiteľnosti, což tento experiment potvrdil.

Čtvrtý experiment byl zaměřen na kalení a popouštění. Tři vzorky byly drženy 2 hodiny na kalící teplotě 800 °C, ochlazovalo se ve vodě. Tím vznikla tvrdá, ale křehká struktura s průměrnou tvrdostí o 275 % vyšší, než byla tvrdost v dodávaném stavu. Popouštění trvalo 1 hodinu na teplotě 600 °C, ochlazovalo se na vzduchu. Tím došlo ke snížení vnitřního pnutí a tvrdosti.

Experimenty lze považovat za úspěšné, jejich výsledky potvrdily vlivy tepelného zpracování, které byly nastíněny v teoretické části práce.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. ISBN 80-720-4248-3.
2. *What Is Heat Treatment? Methods & Benefits. Fractory* [online]. Manchester: Fractory, 2020 [cit. 2021-03-25]. Dostupné z: <https://fractory.com/heat-treatment-methods/>
3. KABOŇ, Lukáš. *Znovuobnovení vysoké pece č. 2, která byla dočasně odstavena z důvodu poklesu poptávky v důsledku pandemie koronaviru v Ostravě*. In: Moravskoslezský deník [online]. Ostrava: Vltava Labe Media, 2020, 2020 [cit. 2021-04-08]. Dostupné z: <https://moravskoslezsky.denik.cz/galerie/odpich-vysoke-pece-v-ostrove2020.html?back=2113538149-2514-57&photo=4>
4. LENFELD, Petr. *Technologie II*. Vyd. 2. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2009. ISBN 978-80-7372-466-5.
5. FABÍK, Richard. *Tváření kovů: učební text : studijní materiály pro studijní program Metalurgické inženýrství Fakulty metalurgie a materiálového inženýrství* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2012 [cit. 2021-5-18]. ISBN 978-80-248-2572-4. Dostupné z: <http://www.person.vsb.cz/archivcd/FMMI/TVKB/Tvareni%20kovu.pdf>
6. SCHINDLER, Ivo a Petr KAWULOK. *Deformační chování materiálů: Studijní materiály pro studijní obor Moderní metalurgické technologie na Fakultě metalurgie a materiálového inženýrství*. [online]. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2013 [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: https://www.fmfi.vsb.cz/export/sites/fmfi/modin/cs/studijni-opory/resitelsky-tym-2-metalurgie/deformacni-chovani-materialu/Schindler_Kawulok_Deformacni_chovani_materialu.pdf
7. CHOTĚBOŘSKÝ, Rostislav a Miroslav MULLER. *Stárnutí konstrukčních materiálů*. Průmyslové spektrum [online]. 2006, 14.06.2006 [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/starnuti-konstrukcnich-materialu>
8. *Rozpouštěcí žihání a stárnutí*. Bodycote [online]. Cheshire: Bodycote, c2019 [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <https://www.bodycote.com/cs/sluzby/tepelne-zpracovani/rozpousteci-zihani-starnuti/>
9. KRAUS, Václav. *Tepelné zpracování a slinování*. 3. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2013. ISBN 978-80-261-0260-1.
10. HLUCHÝ, Miroslav, Rudolf PAŇÁK a Oldřich MODRÁČEK. *Strojírenská technologie 1*. 3. přeprac. vyd. Praha: Scientia, 2002. ISBN 80-718-3265-0.
11. PILOUS, Václav. *Tepelné zpracování kovových materiálů*. Brno: TESYDO, 2015. ISBN 978-808-7102-114.
12. ŽĐAS – Tepelné zpracování. In: *zdas.com* [online]. Žďár nad Sázavou: ŽĐAS, c2017 [cit. 2021-03-25]. Dostupné z: https://www.zdas.com/files/uploads/2017/07/zdas-produkce-tepelne-zpracovani_01.jpg
13. Komorová pec. In: *Metalco Material Testing* [online]. Metalco Testing, c2021 [cit. 2021-03-25]. Dostupné z: https://cdn.myshoptet.com/usr/www.metalco.cz/user/shop/big/24629_pic-sbcf-22377-0002-rgb.jpg?5d021be4

14. SCHULZE, Jason. *A technical guide to quenching. Thermal processing* [online]. Pelham: Media Solutions, 2019, 2019 [cit. 2021-04-07]. Dostupné z: <https://thermalprocessing.com/a-technical-guide-to-quenching/>
15. *Žihání*. Bodycote [online]. Cheshire: Bodycote, c2019 [cit. 2021-5-6]. Dostupné z: <https://www.bodycote.com/cs/sluzby/tepelne-zpracovani/zihani-normalizacni-zihani/zihani/>
16. LIDMILA, Zdeněk. *Podklady pro výuku předmětu ETR*. Brno, 2019.
17. *Žihání na snížení pnutí*. Kalirna.cz [online]. Pardubice: MEDUNA vakuová kalírna, c2020 [cit. 2021-5-1]. Dostupné z: <https://www.kalirna.cz/cz/sluzby/11-zihani-na-snizeni-pnuti.html>
18. *Žihání ke snížení pnutí*. Bodycote [online]. Cheshire: Bodycote, c2019 [cit. 2021-5-6]. Dostupné z: <https://www.bodycote.com/cs/sluzby/tepelne-zpracovani/zihani-ke-snizeni-pnuti/>
19. *Rekrystalizace*. Bodycote [online]. Cheshire: Bodycote, c2019 [cit. 2021-5-6]. Dostupné z: <https://www.bodycote.com/cs/sluzby/tepelne-zpracovani/zihani-normalizacni-zihani/rekrystalizace/>
20. *Žihání na měkko*. Kalirna.cz [online]. Pardubice: MEDUNA vakuová kalírna, c2020 [cit. 2021-5-1]. Dostupné z: <https://www.kalirna.cz/cz/sluzby/9-zihani-na-mekko.html>
21. *Žihání na měkko*. Bodycote [online]. Cheshire: Bodycote, c2019 [cit. 2021-5-6]. Dostupné z: <https://www.bodycote.com/cs/sluzby/tepelne-zpracovani/zihani-normalizacni-zihani/zihani-na-mekko/>
22. *Normalizační žihání*. Kalirna.cz [online]. Pardubice: MEDUNA vakuová kalírna, c2020 [cit. 2021-5-1]. Dostupné z: <https://www.kalirna.cz/cz/sluzby/10-normalizacni-zihani.html>
23. *Normalizační žihání*. Bodycote [online]. Cheshire: Bodycote, c2019 [cit. 2021-5-6]. Dostupné z: <https://www.bodycote.com/cs/sluzby/tepelne-zpracovani/zihani-normalizacni-zihani/normalizacni-zihani/>
24. *Izotermické žihání*. Kalirna.cz [online]. Pardubice: MEDUNA vakuová kalírna, c2020 [cit. 2021-5-1]. Dostupné z: <https://www.kalirna.cz/cz/sluzby/14-izotermicke-zihani.html>
25. WOJES, Ryan. *Using quenching to harden steel in metalworking*. ThoughtCo [online]. New York: Dotdash, 2019 [cit. 2021-5-6]. Dostupné z: <https://www.thoughtco.com/what-is-the-definition-of-quenching-in-metalworking-2340021>
26. *Termální kalení*. Bodycote [online]. Cheshire: Bodycote, c2019 [cit. 2021-5-6]. Dostupné z: <https://www.bodycote.com/cs/sluzby/tepelne-zpracovani/kaleni-popusteni-zuslechteni/termalni-kaleni/>
27. *Zmrazování*. Kalirna.cz [online]. Pardubice: MEDUNA vakuová kalírna, c2020 [cit. 2021-5-1]. Dostupné z: <https://www.kalirna.cz/cz/sluzby/30-zmrazovani.html>
28. *Bainitické kalení*. Kalirna.cz [online]. Pardubice: MEDUNA vakuová kalírna, c2020 [cit. 2021-5-1]. Dostupné z: <https://www.kalirna.cz/cz/sluzby/70-bainiticke-kaleni.html>

29. *Bainitické kalení*. Bodycote [online]. Cheshire: Bodycote, c2019 [cit. 2021-5-6]. Dostupné z: <https://www.bodycote.com/cs/sluzby/tepelne-zpracovani/kaleni-popusteni-zuslechteni/bainiticke-kaleni/>
30. *Popouštění*. Kalirna.cz [online]. Pardubice: MEDUNA vakuová kalírna, c2020 [cit. 2021-5-1]. Dostupné z: <https://www.kalirna.cz/cz/sluzby/31-popousteni.html>
31. *Popouštění*. Bodycote [online]. Cheshire: Bodycote, c2019 [cit. 2021-5-6]. Dostupné z: <https://www.bodycote.com/cs/sluzby/tepelne-zpracovani/kaleni-popusteni-zuslechteni/popousteni/>
32. *Inspekční certifikát 3.1, EN 10204:2004*. 2019. Třinec: Třinecké železářny Moravia Steel, 2019.
33. *CITACE PRO*. [online]. 2021 [cit. 2021-05-12]. Dostupné z: <https://www.citacepro.com/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

| Označení | Legenda | Jednotka |
|---|--|----------|
| a | Charakteristický rozměr | [mm] |
| A | Austenit | [-] |
| A ₁ , A ₃ , A _{cm} | Překrystalizační teploty v diagramu Fe-C | [°C] |
| B | Bainit | [-] |
| B _f | Teplota konce bainitické přeměny | [°C] |
| B _s | Teplota začátku bainitické přeměny | [°C] |
| F | Ferit | [-] |
| F _s | Teplota začátku feritické přeměny | [°C] |
| HRC | Tvrdost podle Rockwella | [-] |
| HV | Tvrdost podle Vickerse | [-] |
| KPC | Kubická planicentrická mřížka | [-] |
| KSC | Kubická stereocentrická mřížka | [-] |
| M | Martenzit | [-] |
| M _f | Teplota konce martenzitické přeměny | [°C] |
| M _s | Teplota začátku martenzitické přeměny | [°C] |
| P | Perlit | [-] |
| P _f | Teplota konce perlitické přeměny | [°C] |
| P _s | Teplota začátku perlitické přeměny | [°C] |
| t | Teplota pece | [°C] |
| t ₀ | Teplota ohřevu | [°C] |
| t _j | Teplota jádra | [°C] |
| t _p | Teplota povrchu | [°C] |
| δ | Tažnost | [%] |
| ε | Deformace | [-] |
| σ | Napětí | [MPa] |
| σ _K | Mez kluzu | [MPa] |
| σ _P | Mez pevnosti | [MPa] |

SEZNAM OBRÁZKŮ

| | |
|---|----|
| Obr. 1 Výroba železa ve vysoké peci [3]..... | 9 |
| Obr. 2 Změna mech. vlastností tvářením [4]..... | 10 |
| Obr. 3 Změna struktury tvářením [4]..... | 10 |
| Obr. 4 Pružná a plastická deformace [4] | 11 |
| Obr. 5 KPC mřížka [6] | 11 |
| Obr. 6 KSC mřížka [6] | 11 |
| Obr. 7 Křivky deformačního zpevnění [6] | 12 |
| Obr. 8 Vliv teploty na tvařitelnost [6] | 13 |
| Obr. 9 Schéma rozdělení ocelí ke tvářením [1] | 13 |
| Obr. 10 Obecný diagram tepelného zpracování [9]..... | 15 |
| Obr. 11 Komorová pec [13]..... | 15 |
| Obr. 12 Vozová pec [12] | 15 |
| Obr. 13 Schématické znázornění vlivu způsobu ohřevu na vznik teplotních rozdílů [9]... | 16 |
| Obr. 14 Schéma průběhu ochlazování v prostředí se změnou skupenství [14]..... | 17 |
| Obr. 15 Oblasti žhacích teplot v diagramu Fe-Fe ₃ C: a) ke snížení pnutí, b) rekrytalizační, c) na měkko, d) normalizační, e) homogenizační [1]..... | 18 |
| Obr. 16 Obecný diagram tep. zpracování s překrytalizací a bez překrytalizace [16]..... | 18 |
| Obr. 17 Žhání na snížení vnitřního pnutí [16]..... | 19 |
| Obr. 18 Rekrytalizace a struktura před a po žhání [16] | 20 |
| Obr. 19 Žhání na měkko [16] | 20 |
| Obr. 20 Homogenizační žhání [16] | 21 |
| Obr. 21 Normalizační žhání [16]..... | 22 |
| Obr. 22 Izotermické žhání [16] | 22 |
| Obr. 23 Rozdělení způsobů kalení [10] | 23 |
| Obr. 24 Průběh ochlazování válcového tělesa z uhlíkové oceli [1]..... | 23 |
| Obr. 25 Průběh ochlazování válcového tělesa z legované oceli [1] | 24 |
| Obr. 26 Křivka prokalitelnosti [1] | 24 |
| Obr. 27 Jominyho zkouška [11] | 24 |
| Obr. 28 Pásmo kalících teplot v diagramu Fe-Fe ₃ C [1] | 25 |
| Obr. 29 Srovnání kalících prostředí [10] | 26 |
| Obr. 30 Nepřetržité kalení [10]..... | 27 |
| Obr. 31 Lomené kalení [10] | 28 |
| Obr. 32 Termální kalení [10]..... | 28 |
| Obr. 33 (1) – izotermické zušlechťování, (2) - izotermické kalení [10] | 29 |
| Obr. 34 Nepřetržité kalení [10]..... | 30 |
| Obr. 35 Pokles tvrdosti kalené nelegované nástrojové oceli v závislosti na popouštěcí teplotě [10] | 31 |
| Obr. 36 Rozměry vzorku | 32 |
| Obr. 37 Vyhodnocování vtisku..... | 32 |
| Obr. 39 Tvrdoměr Zwick 3212..... | 33 |
| Obr. 38 Rozmístění vtisků na vzorku | 33 |
| Obr. 40 Lis CZR 500 | 33 |
| Obr. 41 Srovnání velikosti deformace | 34 |
| Obr. 42 Porovnání tvrdosti po pýchování | 34 |
| Obr. 43 Napýchované, rekrytalizované vzorky s vybroušenými čely..... | 35 |
| Obr. 44 Komorová pec | 35 |
| Obr. 45 Porovnání tvrdosti po rekrytalizaci..... | 36 |
| Obr. 46 Srovnání tvrdosti mezi jednotlivými vtisky | 38 |

SEZNAM TABULEK

| | |
|---|----|
| Tab. 1 Mezní obsahy legovacích prvků [1] | 12 |
| Tab. 2 Chemické složení oceli C45 [30] | 31 |
| Tab. 3 Mechanické vlastnosti oceli C45 [30] | 31 |
| Tab. 4 Tvrdost v dodaném stavu | 32 |
| Tab. 5 Tvrdost po přechování | 33 |
| Tab. 6 Tvrdost po rekrytalizaci | 34 |
| Tab. 7 Tvrdost po žíhání na měkko | 35 |
| Tab. 8 Tvrdost po kalení | 36 |
| Tab. 9 Tvrdost po popouštění | 36 |